



TUGAS AKHIR - MO141326

STUDI NUMERIK DAN EKSPERIMEN OLAH GERAK SPAR HELICAL STRAKES DAN DINAMIKA TEGANGAN SISTEM TAMBAT TIPE TAUT PADA KONDISI KEGAGALAN TALI TAMBAT

AHMAD SABILUL MUTTAQIN

NRP. 043114 40000 022

Dosen Pembimbing :

Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.

Ir. Murdjito, M.Sc. Eng.

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA 60111

2018



FINAL PROJECT - MO141326

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES MOTIONS OF SPAR HELICAL STRAKES AND TAUT MOORING SYSTEM TENSION OF ACCIDENTAL CONDITION

AHMAD SABILUL MUTTAQIN

NRP. 043114 40000 022

Supervisors :

Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.

Ir. Murdjito, M.Sc. Eng.

OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT

FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY

SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY

SURABAYA 60111

2018

STUDI NUMERIK DAN EKSPERIMEN OLAH GERAK STRUKTUR
SPAR *HELICAL STRAKES* DAN DINAMIKA TEGANGAN SISTEM
TAMBAT TIPE *TAUT* PADA KONDISI KEGAGALAN TALI TAMBAT

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi S-1 Departemen Teknik Kelautan

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

AHMAD SABILUL MUTTAQIN

NRP. 04311440000022

Disetujui oleh :

1. Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D. (Pembimbing 1)

2. Ir. Murdjito, M.Sc., Eng. (Pembimbing 2)

3. Dr. Eng. Rudi Walujo P., S.T., M.T. (Penguji)

4. Yoyok Setyo H., S.T., M.T., Ph.D. (Penguji)

SURABAYA, JULI 2018

STUDI NUMERIK DAN EKSPERIMEN OLAH GERAK
STRUKTUR SPAR *HELICAL STRAKES* DAN DINAMIKA
TEGANGAN SISTEM TAMBAT TIPE *TAUT* PADA KONDISI
KEGAGALAN TALI TAMBAT

Nama : Ahmad Sabilul Muttaqin
NRP : 04311440000022
Departemen : Teknik Kelautan FTK ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc. Ph.D
. Ir. Murdjito, M.Sc., Eng.

ABSTRAK

Teknologi SPAR *Platform* dianggap lebih efektif biaya dan fleksibel di laut dalam. SPAR (*Single Point Anchor Reservoir*) merupakan struktur lepas pantai berbentuk silinder yang berfungsi untuk melakukan pengeboran, produksi, pemrosesan dan penyimpanan minyak bumi. Sedangkan *helical strakes* merupakan sebuah piranti yang digunakan untuk mengurangi gaya gelombang dan arus yang mengenai struktur. Untuk menjaga SPAR tetap pada posisi awal yang direncanakan, dibutuhkan tali tambat yang dihubungkan ke jangkar dasar laut namun jika tali tambat mengalami kegagalan maka dapat menyebabkan kegagalan pada SPAR. Struktur SPAR dengan *helical strakes* mempunyai respon lebih kecil pada mode gerak *heave* dan *pitch*, namun mempunyai respon lebih besar pada gerak *surge* dibandingkan dengan SPAR tanpa *helical strakes*. Untuk kondisi *accidental* metode numeris dan eksperimen *tension* maksimum terjadi pada tali tambat yang berada di posisi depan arah datang gelombang, dengan nilai 893.06 ton pada metode numeris dan 914.06 ton pada metode eksperimen. Berdasarkan API RP 2 SK *tension* maksimum pada metode numeris dan metode eksperimen masih dapat diterima karena masih dibawah *tension* yang diijinkan sebesar 960 ton.

Kata kunci : SPAR, *tension*, *accidental*, *helical strakes*.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES MOTIONS OF SPAR
HELICAL STRAKES AND TAUT MOORING SYSTEM TENSION OF
ACCIDENTAL CONDITION

Name : Ahmad Sabilul Muttaqin
NRP : 04311440000022
Department : Teknik Kelautan FTK ITS
Supervisors : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc. Ph.D
. Ir. Murdjito, M.Sc., Eng.

ABSTRACT

SPAR Platform Technology is considered more effective cost and flexible in the deep sea. SPAR (Single Point Anchor Reservoir) is a cylindrical offshore structure that serves to drill, produce, process and storage. While helical strakes are a device used to reduce the force of the wave and current that crashing into structure. To keep the SPAR at an initial position, a mooring connected to the seabed anchor is required but if the moor fails it can cause a failure on the SPAR. The SPAR structure with helical strakes has a smaller response to heave and pitch motion, but has a greater response to surge motion than SPAR without helical strakes. For accidental conditions numerical method and experiments method, maximum tension occur on the line in the forward position of the incident wave direction, with a value of 893.06 tons in the numerical method and 914.06 tons in the experimental method. Based on API RP 2 SK the maximum tension on numerical methods and experimental methods is still acceptable because it is still below the allowable tension of 960 tons.

Keyword : SPAR, *tension, mooring, accidental, helical strakes.*

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas rahmatNya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir dengan lancar. Alhamdulillah penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir diberikan kesehatan sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan sebaik-baiknya. Tugas Akhir ini berjudul **“Studi Numerik dan Eksperimen Olah Gerak Struktur SPAR *Helical Strakes* dan Dinamika Tegangan Sistem Tambat Tipe Taut pada Kondisi Kegagalan Tali Tambat”**

Tugas Akhir ini membahas tentang olah gerak dan dinamika tegangan dari struktur SPAR *helical strakes* yang dianalisa secara numeris dan eksperimen. Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan studi (S1) di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Demikian laporan Tugas Akhir yang penulis susun, semoga bermanfaat dan dapat dijadikan referensi bagi orang yang membutuhkan. Penulis ucapkan terima kasih kepada pembimbing penyusunan laporan.

Surabaya, Juli 2018

Ahmad Sabilul Muttaqin

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam kesempatan ini penulis ucapkan terima kasih atas bimbingan, dukungan, serta doa dari pihak yang terkait dalam pengerjaan dan penulisan laporan Tugas Akhir ini. Tanpa adanya dukungan dan bimbingan dari pihak-pihak terkait dipastikan penulis tidak dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini. Oleh karena itu, penulis ucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis yang selalu mendukung dan mendoakan, sehingga penulis dapat menyelesaikan perkuliahan ini.
2. Prof. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D. dan Ir. Murdjito, M.Sc. Eng. yang telah memberikan ilmunya serta sabar membimbing penulis untuk menyelesaikan laporan ini.
3. Silvianita, S.T., M.Sc., Ph.D. yang selaku dosen wali penulis dalam masa perkuliahan.
4. Seluruh dosen pengajar serta tenaga pendidik Departemen Teknik Kelautan yang telah memberikan ilmu serta layanan dalam kegiatan perkuliahan.
5. Bapak Condro, Mas Rudi, dan Mas Hendra selaku teknisi laboratorium Hidronamika ITS yang telah memberikan bantuan selama pengerjaan Tugas Akhir ini.
6. Bapak Ali sebagai pegawai Laboratorium Hidrodinamika Indonesia (LHI) yang telah membantu dalam mengolah data hasil eksperimen.
7. Tim tugas akhir eksperimen ini yaitu, Grandhis, Rudi, Ian, dan Agung yang telah berjuang bersama dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
8. Yudo dan teman-teman PPNS yang telah membantu dalam penyusunan instrumen eksperimen.
9. Teman teman Maelstrom yang saling membantu dalam belajar di Departemen Teknik Kelautan.

DAFTAR ISI

COVER	i
JUDUL	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vi
UCAPAN TERIMA KASIH	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR LAMPIRAN	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xvi
 BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan	4
1.4 Manfaat	4
1.5 Batasan Masalah	4
1.6 Sistematika Penulisan	5
 BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	
2.1 Tinjauan Pustaka	7
2.2 Dasar Teori	9
2.2.1 SPAR	9
2.2.2 Gerak Bangunan Apung	10
2.2.3 Beban Hidrodinamika	11
2.2.4 Teori Gelombang Airy	12
2.2.5 Gaya Eksitasi	13
2.2.6 Gaya Reaksi	14
2.2.7 Persamaan Gerak	17
2.2.8 RAO	20

2.2.9 Sistem Tambat	21
2.2.10 <i>Helical Strakes</i>	23
2.2.11 Teori Pemodelan	23
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Diagram Alir	29
3.2 Penjelasan Diagram Alir	32
3.2.1 Studi Literatur dan Pengumpulan Data.....	32
3.2.2 Pemodelan Kondisi	34
3.2.3 Pemodelan Eksperimen dan Numerik.....	34
3.2.4 Rancang Model dan Sistem Tambat	35
3.2.5 Parameter Tali Tambat.....	38
3.2.6 Rancang Instrumen	39
3.2.7 Perhitungan Gerak Numeris dan Eksperimen.....	41
3.2.8 Perhitungan Tegangan Numeris dan Eksperimen.....	43
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN	
4.1 Pemodelan Struktur.....	45
4.1.1 Pemodelan Numerik.....	45
4.1.2 Pemodelan Eksperimen.....	47
4.2 Validasi Model Numerik.....	55
4.3 Validasi Model Eksperimen.....	55
4.4 Pemodelan Tali Tambat	61
4.5 Instrumen	62
4.5.1 Kalibrasi <i>Gyroscope</i>	63
4.5.2 Kalibrasi <i>Image Processing</i>	65
4.5.3 Kalibrasi <i>Load Cell</i>	67
4.6 RAO Terapung Bebas	73
4.6.1 Metode Numeris Terapung Bebas	73
4.6.2 Metode Eksperimen Terapung Bebas	75
4.6.3 Perbandingan RAO Terapung Bebas Metode Numerik dan Eksperimen.....	80
4.6.4 Perbandingan RAO SPAR Tanpa Helical Strakes Dengan SPAR <i>Helical Strakes</i> Terapung Bebas.....	83
4.7 RAO Tertambat.....	87

4.7.1	Metode Numeris Tertambat	87
4.7.2	Metode Eksperimen Tertambat.....	89
4.7.3	Perbandingan RAO Tertambat Metode Numerik dan Eksperimen	94
4.8	<i>Tension Tali</i>	96
4.8.1	<i>Tension Tali</i> Metode Numeris	96
4.8.2	<i>Tension Tali</i> Metode Eksperimen	99
4.8.3	Perbandingan <i>Tension Tali</i> Metode Numerik dan Eksperimen	104
4.9	Analisis <i>Tension Tali</i> Pada Kondisi <i>Accidental</i>	107
4.9.1	Kondisi <i>Accidental</i>	107
4.9.2	Analisis <i>Tension</i>	108
4.9.3	Kondisi <i>Accidental</i> 1 Metode Numeris.....	109
4.9.4	Kondisi <i>Accidental</i> 2 Metode Numeris.....	112
4.9.5	Kondisi <i>Accidental</i> 1 Metode Eksperimen	115
BAB V PENUTUP		
5.1	Kesimpulan	119
5.2	Saran.....	119
DAFTAR PUSTAKA		121

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A

LAMPIRAN B

LAMPIRAN C

LAMPIRAN D

LAMPIRAN E

LAMPIRAN F

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Tipe SPAR	2
Gambar 1.2 SPAR Model Milik JIP	3
Gambar 1.3 Konfigurasi Model SPAR Hasil Modifikasi	3
Gambar 2.1 Tampak Depan Model Fisik	8
Gambar 2.2 SPAR Tipe <i>Classic</i>	10
Gambar 2.3 Derajat Kebebasan Bangunan Apung	11
Gambar 2.4 Beban Hidrodinamika Pada Struktur.....	12
Gambar 2.5 Persamaan Massa Tambah Untuk Bentuk Silinder.....	15
Gambar 2.6 <i>Catenary Mooring</i>	22
Gambar 2.7 <i>Taut Mooring</i>	22
Gambar 2.8 <i>Helical Strakes</i>	23
Gambar 3.1a Diagram Alir Pengerjaan.....	29
Gambar 3.1b Diagram Alir Pengerjaan(lanjutan)	30
Gambar 3.1c Diagram Alir Pengerjaan(lanjutan)	31
Gambar 3.1d Diagram Alir Pengerjaan(lanjutan)	32
Gambar 3.2 Rencana Model SPAR.....	36
Gambar 3.3 Desain Pemberat.....	36
Gambar 3.4 Desain Sistem Tambat.....	37
Gambar 3.5 Desain Jangkar dan Pemberat	37
Gambar 3.6 Desain Model Saat Eksperimen Tertambat.....	38
Gambar 3.7 Sistem Kerja <i>Gyroscope</i>	40
Gambar 3.8 Sistem Kerja <i>Loadcell</i>	40
Gambar 3.9 Kamera dan Bola yang Digunakan pada Eksperimen.....	41
Gambar 4.1 Pemodelan <i>Solidwork</i>	46
Gambar 4.2 <i>Meshing</i> Model pada <i>Ansys Aqwa</i>	47
Gambar 4.3 <i>Meshing</i> Model Tampak Depan	47
Gambar 4.4 Ulir dan Silinder di dalam Lambung Model Fisik	48
Gambar 4.5 Model Fisik Tampak Depan.....	49
Gambar 4.6 Desain Pemberat dan Ulir	50

Gambar 4.7 Sarat Model SPAR <i>Helical Strakes</i>	56
Gambar 4.8 Skenario Tes Pendulum Kondisi 1 Perhitungan Jari-Jari Girasi	57
Gambar 4.9 Tes Pendulum Kondisi 1	57
Gambar 4.10 Skenario Tes Pendulum Kondisi 2 Perhitungan Jari-Jari Girasi	58
Gambar 4.11 Tes Pendulum Kondisi 2	58
Gambar 4.12 Bahan Tali Tambat	61
Gambar 4.13 Arduino UNO dn <i>Gyroscope</i>	63
Gambar 4.14 <i>Gyroscope</i> dan Geladak saat Proses Kalibrasi	63
Gambar 4.15 Keluaran Arduino UNO pada Sudut 0^0 Searah Jarum Jam.....	64
Gambar 4.16 Grafik Kalibrasi <i>Gyroscope</i>	65
Gambar 4.17 Proses Kalibrasi <i>Image Processing</i>	66
Gambar 4.18 Keluaran dari Proses Kalibrasi <i>Image Processing</i>	67
Gambar 4.19 Konfigurasi <i>Loadcell</i>	67
Gambar 4.20 Instrumen <i>Loadcell</i> dan Arah Beban.....	68
Gambar 4.21 Beban Kalibrasi	68
Gambar 4.22 Grafik Kalibrasi <i>Loadcell</i> 1	69
Gambar 4.23 Grafik Kalibrasi <i>Loadcell</i> 2.....	70
Gambar 4.24 Grafik Kalibrasi <i>Loadcell</i> 3.....	71
Gambar 4.25 Grafik Kalibrasi <i>Loadcell</i> 4.....	72
Gambar 4.26 RAO Gerakan <i>Heave Free Floating</i> Metode Numeris	73
Gambar 4.27 RAO Gerakan <i>Surge Free Floating</i> Metode Numeris	74
Gambar 4.28 RAO Gerakan <i>Pitch Free Floating</i> Metode Numeris	74
Gambar 4.29 Konfigurasi Tali Penahan <i>Drift</i>	75
Gambar 4.30 Pengujian Kondisi <i>Free Floating</i>	75
Gambar 4.31 <i>Time History</i> Gerakan <i>Surge</i> Pada <i>Image Processing</i>	76
Gambar 4.32 <i>Time History</i> Gerakan <i>Heave</i> Pada <i>Image Processing</i>	77
Gambar 4.33 <i>Time History</i> Gerakan <i>Pitch</i> Pada <i>Image Processing</i>	77
Gambar 4.34 Grafik RAO <i>Surge Free Floating</i> Eksperimen	78
Gambar 4.35 Grafik RAO <i>Heave Free Floating</i> Eksperimen	79
Gambar 4.36 Grafik RAO <i>Pitch Free Floating</i> Eksperimen	80
Gambar 4.37 Grafik Perbandingan RAO <i>Surge Free Floating</i> Metode Numeris dan Eksperimen	81

Gambar 4.38 Grafik Perbandingan RAO <i>Heave Free Floating</i> Metode Numeris dan Eksperimen	82
Gambar 4.39 Grafik Perbandingan RAO <i>Pitch Free Floating</i> Metode Numeris dan Eksperimen	83
Gambar 4.40 Grafik Perbandingan RAO <i>Surge Free Floating Helical Strakes</i> dan Tanpa <i>Helical Strakes</i>	84
Gambar 4.41 Grafik Perbandingan RAO <i>Heave Free Floating Helical Strakes</i> dan Tanpa <i>Helical Strakes</i>	85
Gambar 4.42 Grafik Perbandingan RAO <i>Pitch Free Floating Helical Strakes</i> dan Tanpa <i>Helical Strakes</i>	86
Gambar 4.43 Kondisi Tertambat <i>Ansys Aqwa</i>	87
Gambar 4.44 RAO Gerak <i>Surge</i> Metode Numeris Tertambat.....	88
Gambar 4.45 RAO Gerak <i>Heave</i> Metode Numeris Tertambat.....	88
Gambar 4.46 RAO Gerak <i>Pitch</i> Metode Numeris Tertambat.....	89
Gambar 4.47 Konfigurasi Eksperimen Tertambat	90
Gambar 4.48 Pengujian Kondisi Tertambat.....	90
Gambar 4.49 Grafik RAO <i>Surge</i> Tertambat Eksperimen	91
Gambar 4.50 Grafik RAO <i>Heave</i> Tertambat Eksperimen	92
Gambar 4.51 Grafik RAO <i>Pitch</i> Tertambat Eksperimen	93
Gambar 4.52 Grafik Perbandingan RAO <i>Surge</i> Tertambat Metode Numeris dan Eksperimen	94
Gambar 4.53 Grafik Perbandingan RAO <i>Heave</i> Tertambat Metode Numeris dan Eksperimen.....	95
Gambar 4.54 Grafik Perbandingan RAO <i>Pitch</i> Tertambat Metode Numeris dan Eksperimen.....	96
Gambar 4.55 Pemodelan Tali Tambat dengan Menggunakan <i>Ansys Aqwa</i>	97
Gambar 4.56 RAO <i>Tension</i> Tali Tambat I Metode Numeris.....	97
Gambar 4.57 RAO <i>Tension</i> Tali Tambat II Metode Numeris	98
Gambar 4.58 RAO <i>Tension</i> Tali Tambat III Metode Numeris	98
Gambar 4.59 RAO <i>Tension</i> Tali Tambat IV Metode Numeris	99
Gambar 4.60 Grafik RAO <i>Tension</i> Tali Tambat I Metode Eksperimen	100
Gambar 4.61 Grafik RAO <i>Tension</i> Tali Tambat II Metode Eksperimen.....	101

Gambar 4.62 Grafik RAO <i>Tension</i> Tali Tambat III Metode Eksperimen	102
Gambar 4.63 Grafik RAO <i>Tension</i> Tali Tambat IV Metode Eksperimen	103
Gambar 4.64 Grafik Perbandingan RAO <i>Tension</i> Tali Tambat I Metode Numeris dan Eksperimen	104
Gambar 4.65 Grafik Perbandingan RAO <i>Tension</i> Tali Tambat II Metode Numeris dan Eksperimen	105
Gambar 4.66 Grafik Perbandingan RAO <i>Tension</i> Tali Tambat III Metode Numeris dan Eksperimen	106
Gambar 4.67 Grafik Perbandingan RAO <i>Tension</i> Tali Tambat IV Metode Numeris dan Eksperimen	107
Gambar 4.68 Skenario Kondisi <i>Accidental</i>	108
Gambar 4.69 Model Numeris <i>Accidental</i> 1	109
Gambar 4.70 Grafik <i>Tension</i> Tali Tambat I Kondisi <i>Accidental</i> 1	110
Gambar 4.71 Grafik <i>Tension</i> Tali Tambat II Kondisi <i>Accidental</i> 1	110
Gambar 4.72 Grafik <i>Tension</i> Tali Tambat III Kondisi <i>Accidental</i> 1	111
Gambar 4.73 Grafik <i>Tension</i> Tali Tambat IV Kondisi <i>Accidental</i> 1	111
Gambar 4.74 Model Numeris <i>Accidental</i> 2	112
Gambar 4.75 Grafik <i>Tension</i> Tali Tambat I Kondisi <i>Accidental</i> 2	113
Gambar 4.76 Grafik <i>Tension</i> Tali Tambat II Kondisi <i>Accidental</i> 2	113
Gambar 4.77 Grafik <i>Tension</i> Tali Tambat III Kondisi <i>Accidental</i> 2	114
Gambar 4.78 Grafik <i>Tension</i> Tali Tambat IV Kondisi <i>Accidental</i> 2	114
Gambar 4.79 Grafik <i>Tension</i> Tali Tambat I Kondisi <i>Accidental</i> 1 Eksperimen	115
Gambar 4.70 Grafik <i>Tension</i> Tali Tambat I Kondisi <i>Accidental</i> 1 Eksperimen	116
Gambar 4.71 Grafik <i>Tension</i> Tali Tambat I Kondisi <i>Accidental</i> 1 Eksperimen	116
Gambar 4.72 Grafik <i>Tension</i> Tali Tambat I Kondisi <i>Accidental</i> 1 Eksperimen	117

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 <i>Model to Prototype Multiplier for The Variables Commonly Used in Mechanics Under Froude Scaling</i>	26
Tabel 2.2 <i>Model to Prototype Multiplier for The Variables Commonly Used in Mechanics Under Froude Scaling lanjutan</i>	26
Tabel 3.1 Data Mini SPAR	33
Tabel 3.2 Data <i>Towing Tank</i> Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS	33
Tabel 3.3 Data Lingkungan.....	33
Tabel 3.4 Data <i>Helical Strakes</i>	34
Tabel 3.5 <i>Properties</i> Tali Tambat dari Mini SPAR.....	39
Tabel 3.6 <i>Properties</i> Tali Tambat dari <i>Prototype</i> SPAR.....	39
Tabel 4.1 Data Dimensi Mini SPAR.....	45
Tabel 4.2 Data Distribusi Massa Mini SPAR	46
Tabel 4.3 Hasil Penskalaan Model SPAR.....	48
Tabel 4.4 Hasil Penimbangan Berat Material	49
Tabel 4.5 Perhitungan Momen Inersia Massa PVC	50
Tabel 4.6 Perhitungan Momen Inersia Massa Blok A	51
Tabel 4.7 Perhitungan Momen Inersia Massa Blok B	52
Tabel 4.8 Perhitungan Momen Inersia Massa <i>Topside</i>	52
Tabel 4.9 Perhitungan Momen Inersia Massa Ulir	52
Tabel 4.10 Perhitungan Momen Inersia Massa <i>Helical Strakes</i>	53
Tabel 4.11 Posisi Pusat Massa dari Setiap Material yang Dipakai	53
Tabel 4.12 Pusat Massa Model	54
Tabel 4.13 Jari-jari Girasi Model	54
Tabel 4.14 Perbandingan Distribusi Massa Hasil Skala dengan Hasil Perhitungan	54
Tabel 4.15 Perbandingan dan Validasi Model Numerik dengan Data.....	55
Tabel 4.16 Ukuran-ukuran yang Digunakan pada Tes Pendulum	59
Tabel 4.17 Periode dan Frekuensi Gerak Pendulum Model Kondisi 1 dan 2	59
Tabel 4.18 Validasi Model Fisik.....	60
Tabel 4.19 Properti <i>Mooring Line</i>	61

Tabel 4.20 Spesifikasi Tali Tambat Eksperimen	61
Tabel 4.21 Spesifikasi Tali Tambat Model Fisik.....	62
Tabel 4.22 Perbandingan Kekakuan <i>Prototype</i> dengan <i>Wire Rope</i> Acuan.....	62
Tabel 4.23 Kalibrasi Searah Jarum Jam.....	64
Tabel 4.24 Kalibrasi Berlawanan Jarum Jam.....	65
Tabel 4.25 Data Kalibrasi <i>Loadcell</i> 1 Percobaan 1	69
Tabel 4.26 Data Kalibrasi <i>Loadcell</i> 2	70
Tabel 4.27 Data Kalibrasi <i>Loadcell</i> 3	71
Tabel 4.28 Data Kalibrasi <i>Loadcell</i> 4	72
Tabel 4.29 Persamaan Kalibrasi Keluaran <i>Loadcell</i> dengan Beban	72
Tabel 4.30 Karakteristik Gelombang Eksperimen <i>Free Floating</i>	76
Tabel 4.31 Hasil Analisis FFT Mode Gerak <i>Surge Free Floating</i> Metode Eksperimen	78
Tabel 4.32 Hasil Analisis FFT Mode Gerak <i>Heave Free Floating</i> Metode Eksperimen	79
Tabel 4.33 Hasil Analisis FFT Mode Gerak <i>Pitch Free Floating</i> Metode Eksperimen	80
Tabel 4.34 Nilai Perbandingan RAO <i>Surge Free Floating</i> Metode Numeris dan Eksperimen.....	81
Tabel 4.35 Nilai Perbandingan RAO <i>Heave Free Floating</i> Metode Numeris dan Eksperimen.....	82
Tabel 4.36 Nilai Perbandingan RAO <i>Pitch Free Floating</i> Metode Numeris dan Eksperimen.....	83
Tabel 4.37 Nilai Perbandingan RAO <i>Surge Free Floating</i> SPAR <i>Helical Strakes</i> dengan Tanpa <i>Helical Strakes</i>	84
Tabel 4.38 Nilai Perbandingan RAO <i>Heave Free Floating</i> SPAR <i>Helical Strakes</i> dengan Tanpa <i>Helical Strakes</i>	85
Tabel 4.39 Nilai Perbandingan RAO <i>Pitch Free Floating</i> SPAR <i>Helical Strakes</i> dengan Tanpa <i>Helical Strakes</i>	86
Tabel 4.40 Hasil Analisis FFT Mode Gerak <i>Surge</i> Tertambat Metode Eksperimen.....	91
Tabel 4.41 Hasil Analisis FFT Mode Gerak <i>Heave</i> Tertambat Metode Eksperimen.....	92
Tabel 4.42 Hasil Analisis FFT Mode Gerak <i>Pitch</i> Tertambat Metode Eksperimen.....	93

Tabel 4.43 Nilai Perbandingan RAO <i>Surge</i> Tertambat Metode Numeris dan Eksperimen.....	94
Tabel 4.44 Nilai Perbandingan RAO <i>Heave</i> Tertambat Metode Numeris dan Eksperimen.....	95
Tabel 4.45 Nilai Perbandingan RAO <i>Pitch</i> Tertambat Metode Numeris dan Eksperimen.....	96
Tabel 4.46 <i>Tension Force</i> maksimum tiap tali tambat pada <i>Ansys Aqwa</i>	99
Tabel 4.47 Data <i>Load Cell</i> 1 Hasil Eksperimen.....	100
Tabel 4.48 Data <i>Load Cell</i> 2 Hasil Eksperimen.....	101
Tabel 4.49 Data <i>Load Cell</i> 3 Hasil Eksperimen.....	102
Tabel 4.50 Data <i>Load Cell</i> 4 Hasil Eksperimen.....	103
Tabel 4.51 Nilai Perbandingan RAO <i>Tension</i> Tali Tambat 1 Metode Numeris dan Eksperimen.....	104
Tabel 4.52 Nilai Perbandingan RAO <i>Tension</i> Tali Tambat 2 Metode Numeris dan Eksperimen.....	105
Tabel 4.53 Nilai Perbandingan RAO <i>Tension</i> Tali Tambat III Metode Numeris dan Eksperimen	106
Tabel 4.54 Nilai Perbandingan RAO <i>Tension</i> Tali Tambat IV Metode Numeris dan Eksperimen	107
Tabel 4.55 Batas <i>Tension</i> dan <i>Safety Factor</i>	108
Tabel 4.56 Hasil Analisis Tegangan Kondisi <i>Accidental</i> 1	112
Tabel 4.57 Hasil Analisis <i>Tension</i> Kondisi <i>Accidental</i> 2.....	115
Tabel 4.58 Hasil Analisis <i>Tension</i> Kondisi <i>Accidental</i> 1.....	117

BAB I

PENDAHULUAN

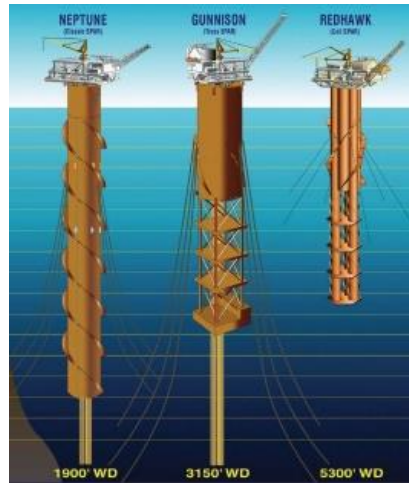
1.1 LATAR BELAKANG

Tidak dipungkiri, kebutuhan dunia akan pemenuhan energi saat ini masih bergantung kepada ketersediaan minyak dan gas, walaupun topik hangat mengenai keberadaan minyak di pasaran yang jatuh sering sekali didengar di beberapa waktu terakhir. Harga minyak dunia yang meluncur tajam secara otomatis berimplikasi pada sulitnya pengembangan sumber daya energi baru terbarukan karena dianggap menelan biaya yang mahal (Aprilian, 2012). Oleh karena itu, eksplorasi dan eksploitasi di ladang-ladang minyak atau gas baru yang dianggap potensial tetap dilakukan walaupun tidak sebanyak ketika minyak dunia belum dihargai serendah sekarang. Pasalnya, peningkatan jumlah penduduk jauh lebih besar ketimbang persediaan sumber daya yang ada (Prasiwi, 2014).

Oleh karena itu, teknologi pemanfaatan minyak dan gas bumi juga semakin berkembang. Dalam kegiatan eksplorasi dan eksploitasi sumber daya minyak dan gas yang dilakukan di lepas pantai, terdapat tiga jenis bangunan yang digunakan meliputi bangunan terpancang, bangunan tertambat, yang lebih dikenal dengan bangunan apung, dan bangunan lentur. Struktur lepas pantai jenis terpancang sudah tidak efektif lagi digunakan untuk eksplorasi dan eksploitasi migas pada laut dalam. Hal ini dikarenakan struktur terpancang membutuhkan rangka baja dari permukaan laut sampai dasar laut, sehingga membutuhkan biaya yang besar.

Platform SPAR menjadi salah satu struktur terapung lepas pantai seperti yang digunakan untuk pengeboran, produksi, pengolahan, penyimpanan dan *offloading* (Agarwal, 2003). Struktur mengapung tersebut terdiri dari silinder vertikal dan struktur yang menyerupai sirip disebut *strakes* yang melekat secara heliks sekitar bagian luar silinder bertindak untuk memecah aliran air terhadap struktur, lebih meningkatkan stabilitas. SPAR memiliki kestabilan yang berasal dari titik pusat berat (*center of gravity*) struktur yang berada di bawah titik pusat *buoyancy* (*center of buoyancy*).

Terdapat tiga jenis SPAR platform yaitu tipe *classic*, tipe *cell*, dan tipe *cell-truss* (Islam, et al., 2012). Tipe *classic* memiliki hard tank berbentuk silinder dengan *tanki ballast* berada pada bagian bawah struktur.



Gambar 1.1. SPAR tipe *classic* (a), *truss* (b) dan *cell* (c). (Kumar, 2015)

Pada bangunan silinder seperti SPAR biasanya terdapat fenomena *vortex induced motion* (VIM) dan *vortex induced vibrations* (VIV) jika terkena beban gelombang dan arus. *Vortex induced motions* (VIM) identik dengan *vortex induced vibrations* (VIV), namun karena periode gerakan yang jauh lebih lama, vibrasi getaran yang diinduksi oleh *vortex* lebih sering disebut *vortex induced motions* (Rijken, et al. 2004). Oleh karena itu, lambung silinder SPAR diberikan piranti tambahan berupa *helical strakes* guna mendapatkan olah gerak struktur SPAR yang lebih baik (Rho, et al., 2003).

SPAR *platform* dalam operasinya di lingkungan laut ditambat dengan menggunakan tali tambat, hal ini bertujuan agar SPAR tetap berada posisi yang direncanakan. Biasanya tali tambat berupa *heavy chain*, *steel wire ropes* dan/atau *synthetic polyester ropes* yang dihubungkan ke jangkar di dasar laut (Stendal, 2015). Dalam dekade terakhir, tingkat kegagalan tinggi pada sistem tambat meningkatkan perhatian di industri lepas pantai (Montasir, 2016).

Pada penelitian ini akan dilakukan analisa numeris dan eksperimen tentang gerakan SPAR *helical strakes* serta tegangan yang terjadi akibat kegagalan tali tambat di mana salah satu tali tambat terputus. Analisa gerakan dan tegangan dibutuhkan untuk

3

membandingkan dengan penelitian sebelumnya pada classic SPAR tanpa *helical strakes*.

1.2 PERUMUSAN MASALAH

1. Bagaimana respon gerakan (*surge, heave dan pitch*) pada *SPAR Helical Strakes* kondisi terapung bebas?
2. Bagaimana respon gerakan (*surge, heave dan pitch*) dan tegangan tali maksimum pada *SPAR Helical Strakes* kondisi tertambat?
3. Berapa tegangan tali maksimum pada *SPAR Helical Strakes* kondisi *accidental*?

1.3 TUJUAN PENELITIAN

1. Mengetahui respon gerakan (*surge, heave dan pitch*) pada *SPAR Helical Strakes* kondisi terapung bebas.
2. Mengetahui respon gerakan (*surge, heave dan pitch*) dan tegangan tali maksimum pada *SPAR Helical Strakes* kondisi tertambat.
3. Mengetahui tegangan tali maksimum pada *SPAR Helical Strakes* kondisi *accidental*.

1.4 MANFAAT

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini yaitu dapat digunakan sebagai acuan dan pertimbangan dalam menghitung lebih lanjut mengenai *SPAR Helical Strakes* kondisi *accidental limit state* dengan empat tali tambat.

1.5 BATASAN MASALAH

Berikut merupakan batasan masalah dalam penelitian ini:

1. Permodelan struktur dilakukan dengan permodelan fisik dan numerik.
2. Analisa dilakukan pada mini SPAR model dari JIP.
3. Permodelan fisik struktur dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS dengan kedalaman *towing tank* ± 2 meter.
4. Gelombang yang digunakan pada permodelan adalah gelombang reguler.
5. Teori gelombang yang digunakan adalah teori gelombang Airy.

6. Gerakan struktur yang ditinjau adalah *surge*, *heave* dan *pitch*.
7. Gerak SPAR merupakan gerak *uncoupled*.
8. Beban yang diperhitungkan hanya beban gelombang.
9. Tali tambat berjumlah empat buah dan simetris.
10. Arah gelombang yang ditinjau adalah dari depan (*head seas*).
11. Efek hidrodinamika dari substruktur tidak diperhitungkan.
12. Interaksi sistem tambat dengan tanah diabaikan.
13. Kondisi *accidental* hanya dianalisa pada arah pembebanan 0° .

1.6 SISTEMATIKA PENULISAN

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menguraikan beberapa hal, antara lain:

- a. Latar Belakang
- b. Perumusan Masalah
- c. Tujuan
- d. Manfaat
- e. Batasan Masalah
- f. Sistematika Penulisan

BAB II DASAR TEORI

Bab ini berisi mengenai teori-teori pendukung, persamaan-persamaan, serta *codes* yang digunakan sebagai acuan dalam menyelesaikan penelitian ini.

BAB III METODOLOGI DAN PERCOBAAN

Bab ini menjelaskan mengenai langkah-langkah melakukan percobaan dan pemodelan serta analisis untuk menyelesaikan penelitian ini. Selain itu juga dilakukan pembahasan data serta validasi dalam penelitian ini.

BAB IV ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menjelaskan mengenai analisa pada pemodelan struktur dengan perangkat lunak, serta pengolahan data dari hasil eksperimen. Sehingga dapat menjawab rumusan masalah pada BAB 1.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini menjelaskan tentang simpulan dari analisis penelitian ini dan saran yang bermanfaat guna keberlanjutan penelitian di masa yang akan datang.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

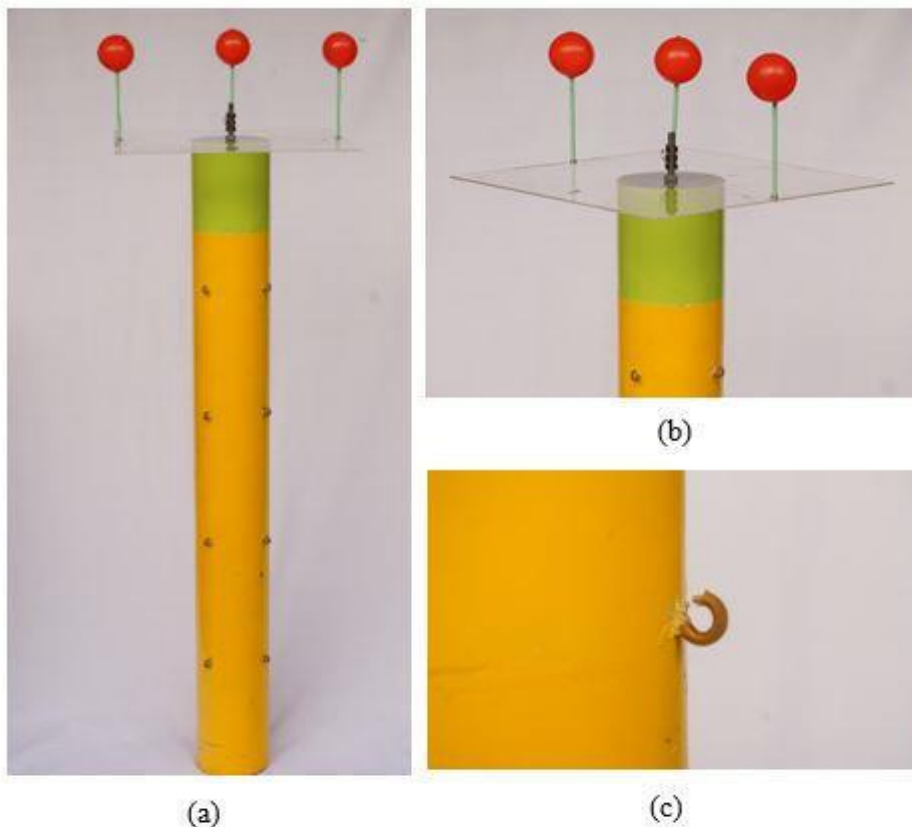
2.1 TINJAUAN PUSTAKA

Karena eksplorasi dan eksplotasi minyak dan gas semakin ke arah laut dalam, banyak struktur lepas pantai mengapung yang diusulkan untuk menghemat biaya. SPAR adalah salah satu struktur lepas pantai mengapung yang digunakan untuk pengeboran, produksi, dan pengolahan minyak dan gas. Konsep SPAR sebagai struktur lepas pantai bukanlah hal baru (Agarwal, 2003). Sebagai contoh, Brent SPAR *platform* dibangun oleh Royal Dutch Shell sebagai *storage* dan *offloading* di laut utara (Bax and de Werk, 1974, Van Santen and de Werk, 1976; Glanville et al., 1997).

Pengujian model *classic* SPAR sudah dilakukan oleh Joint Industry Project (1995) dan Chen et al (2001). Joint Industry Project (1995) melakukan pengujian gerakan dua model SPAR, Consortium SPAR dan Mini SPAR yang memiliki sarat air lebih dangkal, dengan kesimpulan SPAR yang memiliki sarat air lebih dangkal merespon gerakan *pitch* lebih besar daripada SPAR dengan sarat air yang dalam. Sedangkan Chen et al (2001) menemukan semakin dalam perairan semakin besar *damping* tali tambat mengurangi respon gerakan *surge* dan *pitch* pada SPAR. Mekha et al (1996) juga melakukan penelitian mengenai SPAR, beliau memodelkannya dengan tiga derajat kebebasan (*surge, pitch, heave*). Gaya inersia dihitung dengan menggunakan C_m , seperti pada persamaan Morison atau menggunakan koefisien C_m berdasarkan teori difraksi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan menggunakan frekuensi atau koefisien inersia C_m , menghasilkan hasil yang sama karena sebagian besar energi gelombang terkonsentrasi selama rentang frekuensi dimana nilai C_m sama dengan 2 untuk ukuran SPAR yang digunakan dalam literatur.

Sedangkan Ran dan Kim (1996) memepelajari karakteristik respon nonlinier dari SPAR yang ditambatkan dalam gelombang reguler dan irreguler. Sementara Feng et al (2012) dan Mohammed et al (2012) melakukan analisa SPAR tipe *truss* dengan pengaruh terputusnya beberapa tali tambat, hasilnya adalah gerakan *surge* lebih

signifikan berubah daripada gerak *heave* dan *pitch* yang relatif konstan. Naufal et al (2016) melakukan penelitian mengenai olah gerak struktur SPAR tipe *classic* dan dinamika tegangan sistem tambat tipe taut pada kondisi kegagalan tali tambat. Hasil dari penelitian tersebut yaitu gerakan pada kondisi terapung bebas menghasilkan mode gerak *heave* paling signifikan, sedangkan gerakan pada kondisi tertambat menghasilkan mode gerak *surge* mengalami kenaikan besar gerakan dan pergeseran frekuensi natural. Analisa tegangan tali pada kondisi *accidental* menghasilkan tegangan tali maksimum pada bagian depan dari arah gelombang datang. Kemudian untuk line yang memiliki posisi simetri dengan tali yang diputus mengalami penurunan tegangan yang signifikan. Terjadi ketidak stabilan setelah terjadi *accident*.



Gambar 2.1 Tampak Depan Model Fisik (a), Tampak Geladak (b) dan *Fairlead* Model (c). (Naufal, 2016)

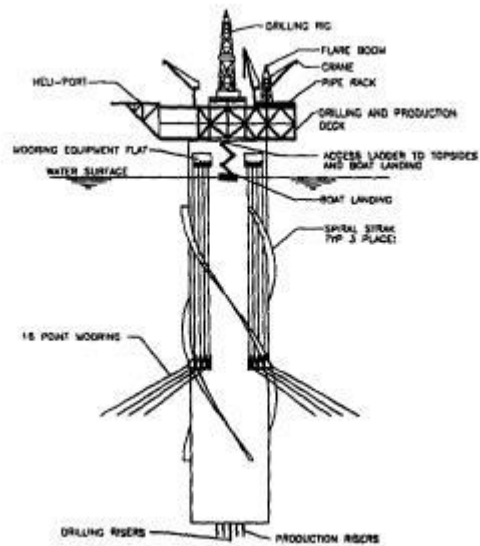
2.2 DASAR TEORI

2.2.1 SPAR

SPAR (*Single Point Anchor Reservoir*) menjadi salah satu struktur terapung lepas pantai seperti yang digunakan untuk pengeboran, produksi, pengolahan, penyimpanan dan *offloading* (Agarwal, 2003). Struktur mengapung tersebut terdiri dari silinder vertikal dan struktur yang menyerupai sirip disebut *strakes* yang melekat secara heliks sekitar bagian luar silinder bertindak untuk memecah aliran air terhadap struktur, lebih meningkatkan stabilitas.

SPAR memiliki kestabilan yang berasal dari titik pusat berat (*center of gravity*) struktur yang berada di bawah titik pusat *buoyancy* (*center of buoyancy*). Frekuensi natural dari semua jenis bangunan SPAR lebih rendah dibandingkan frekuensi gelombang yang terjadi di laut (Ran et al, 1995). Periode natural dari bangunan SPAR klasik untuk gerakan *heave* dan *pitch* umumnya panjang karena *waterplane area* yang kecil dibandingkan dengan volume bangunan yang tercelup, oleh karena itu bangunan SPAR biasanya tidak tereksitasi secara vertikal (Jun et al ,2002). Hal ini disebabkan karena SPAR memiliki massa yang besar dan gaya kekakuan pengembali yang rendah (Chen et al, 1999). Dalam perkembangannya SPAR dibagi menjadi tiga jenis yaitu tipe klasik, tipe *truss*, dan tipe *cell*.

Pada SPAR bertipe klasik, struktur terdiri dari lambung berbentuk silinder dan bangunan atas (*topside*). Lambung berbentuk silinder ini berfungsi memberi daya apung pada struktur, lambung ini juga dapat difungsikan sebagai tempat penyimpanan hidrokarbon. Pada bagian bawah lambung juga terdapat ballast yang berfungsi sebagai pengatur stabilitas SPAR. Di tengah silinder terdapat *moonpool* (rongga kosong yang terbuka terhadap lautan) yang berfungsi sebagai tempat riser terhubung terhadap sumur produksi di dasar laut. Selain itu SPAR juga didukung dengan tali tambat agar tetap berada pada posisi yang direncanakan.



Gambar 2.2 SPAR tipe *classic*. (Agarwal, 2003)

2.2.2 Gerak Bangunan Apung

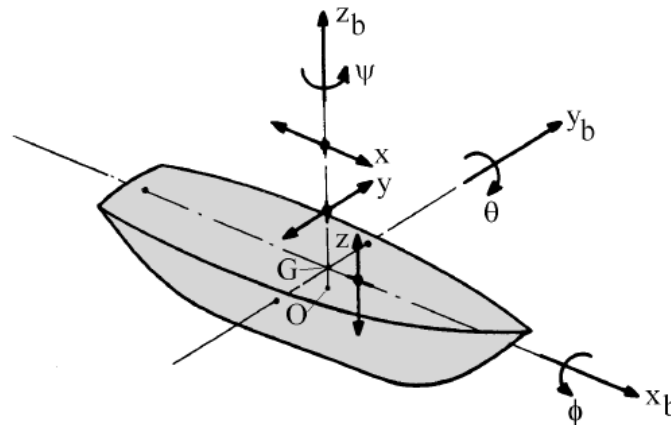
SPAR dimodelkan sebagai silinder kaku dengan enam derajat kebebasan. Gerakan bangunan apung tersebut dipisahkan menjadi dua kelompok yaitu gerak translasi dan gerak rotasi. Pada setiap arah sumbu, bangunan apung memiliki satu gerakan translasi dan satu gerakan rotasi. Berikut ini adalah penamaan masing-masing gerakan bangunan apung:

1. Gerak Translasi

- *Surging*, merupakan gerakan translasi pada arah sumbu x.
- *Swaying*, merupakan gerakan translasi pada arah sumbu y.
- *Heaving*, merupakan gerakan translasi pada arah sumbu z.

2. Gerak Rotasi

- *Rolling*, merupakan gerakan rotasional terhadap sumbu x.
- *Pitching*, merupakan gerakan rotasional terhadap sumbu y.
- *Yawing*, merupakan gerakan rotasional terhadap sumbu z.

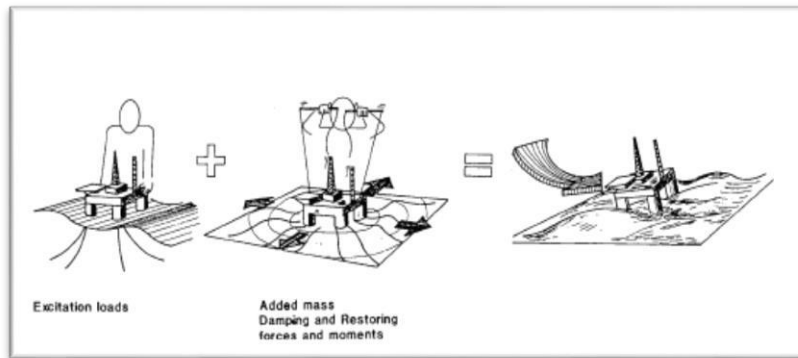


Gambar 2.3 Derajat Kebebasan Bangunan Apung (Journee, et al., 2001)

2.2.3 Beban Hidrodinamika

Suatu struktur terapung akan menerima beban hidrodinamika. Beban hidrodinamika yang diterima oleh struktur terapung dapat dipahami sebagai 2 sub-masalah (Faltinsen, 1990) diantaranya:

1. Gaya dan momen yang dirasakan struktur terapung, saat benda ditahan untuk berosilasi namun menerima gelombang datang. Beban ini disebut sebagai beban akibat eksitasi gelombang. Beban ini secara umum terdiri dari gaya tekanan (yang biasa disebut Froude Krylov *Force*) dan gaya difraksi.
2. Gaya dan momen yang dirasakan struktur terapung, saat struktur digetarkan dengan frekuensi yang sama dengan gaya eksitasi gelombang yang datang. Namun, pada kali ini, tidak ada gelombang yang mengenai struktur. Beban hidrodinamika yang didapat dari sub masalah ini adalah beban massa tambah (*added mass*), beban redaman (*damping*) dan beban kekakuan (*restoring force*). Beban ini bisa juga dianggap sebagai beban reaksi akibat pergerakan struktur.



Gambar 2.4 Beban Hidrodinamika Pada Struktur.

Sub masalah 1 dan 2 tersebut dapat dihubungkan secara linear sehingga gaya hidrodinamik total pada struktur terapung merupakan penjumlahan sub-masalah 1 dan sub-masalah 2.

2.2.4 Teori Gelombang Airy

Gelombang sebagaimana halnya dengan fluida dinamis yang lain dapat dipandang sebagai aliran fluida cair yang mempunyai pola khas, yang dapat diformulasikan secara matematis dengan mempertimbangkan kaidah-kaidah dan hukum-hukum tertentu (Djarmiko, 2003). Perumusan yang paling sederhana dari gelombang laut adalah dalam bentuk osilasi sinusoidal, seperti yang telah dikenalkan oleh Airy (1845). Teori ini didasarkan pada asumsi bahwa tinggi gelombang adalah relatif kecil bila dibandingkan dengan panjangnya, ataupun kedalaman perairan dimana gelombang berpropagasi.

Adapun asumsi yang dari teori gelombang Airy adalah sebagai berikut :

1. Amplitudo gerakan relatif kecil jika dibandingkan dengan panjang gelombang.
2. Permukaan dasar laut datar dan *impermeable* sehingga kecepatan arah vertikal sama dengan 0.
3. Gaya *coriolis* diabaikan.
4. Tekanan pada permukaan air adalah *uniform* dan konstan.
5. Fluida dianggap *irrational*, homogen, *incompressible* dan *non-viscosity*.

2.2.5 Gaya Eksitasi

Menurut Faltinsen (1990), gaya eksitasi yang diterima oleh struktur terjadi akibat adanya distribusi tekanan yang tidak merata dari gelombang. Dampak dari tekanan yang tidak merata ini disebut gaya Froude-Krylof. Sedangkan menurut Journee & Massie (2001), pada struktur dengan ukuran besar keberadaan juga akan mempengaruhi perubahan distribusi tekanan. Efek dari perubahan distribusi tekanan akibat adanya struktur yang besar ini disebut dengan gaya difraksi. Berikut merupakan persamaan yang digunakan untuk mencari gaya Froude-Krylof:

$$F_{FK_i} = \int p n_i dA \quad (2.1)$$

dengan,

- p = distribusi tekanan
- n = unit vector
- dA = luasan kecil dari suatu benda.

Persamaan (2.1) menghubungkan antara distribusi tekanan yang diakibatkan medan gelombang dengan luas permukaan dari struktur. Distribusi tekanan gelombang di laut dalam untuk struktur didapat dengan menggabungkan persamaan potensial gelombang dengan persamaan berneoulli sehingga didapat persamaan (2.2). Sedangkan gaya difraksi pada struktur terapung perlu dilakukan peninjauan syarat batas dari setiap kasus dan memerlukan pendekatan matematis yang kompleks.

$$p = \rho g \zeta_o e^{kz} \sin(\omega t - kx) \quad (2.2)$$

dengan,

- ρ = massa jenis air sekitar struktur (kg/m)
- g = percepatan gravitasi (m/s²)
- ζ_o = amplitudo gelombang (m)
- k = angka gelombang (rad/m)

z	= posisi di sumbu vertikal, dengan nilai 0 di permukaan air (m)
ω	= frekuensi gelombang (rad/s)
t	= waktu (s)
x	= posisi di sumbu horizontal, searah dengan arah gelombang (m)

2.2.6 Gaya Reaksi

Gaya reaksi pada struktur dipengaruhi oleh massa struktur, massa tambah (*added mass*), redaman (*damping*), dan kekakuan (*stiffness*). Berikut penjelasan lebih rinci mengenai masing-masing komponen tersebut.

a. Massa

Massa dari struktur yang mengapung di air dapat dihitung dengan menerapkan hukum Archimedes. Pada penelitian ini, struktur yang dianalisa berupa SPAR dimana massa dari SPAR ini dapat dihitung dengan meninjau bagian struktur SPAR yang terendam di air atau disebut juga *volume displacement* dikalikan dengan massa jenis perairan tersebut. Sehingga massa dari struktur SPAR dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$(\Delta) = \frac{1}{4} \times \pi \times D^2 \times T \times \rho \quad (2.3)$$

dengan,

Δ = massa dari struktur yang tercelup (displacement)

D = diameter struktur

T = Sarat air

ρ = Massa jenis air

b. Massa tambah (*Added Mass*)

Massa tambah merupakan efek penambahan massa yang diakibatkan oleh ikut Bergeraknya fluida di sekitar benda terapung (Newman, 1997). Ikut Bergeraknya fluida tersebut menambah energi kinetik, sehingga diperlukan gaya eksternal. Gaya tersebut jika dibagi dengan percepatan benda maka akan

menghasilkan komponen massa. Massa inilah yang dianggap sebagai massa tambah. Massa tambah bergantung terhadap bentuk benda serta mode gerak. Sarpkaya (2010) menemukan beberapa nilai massa tambah untuk beberapa bentuk sederhana. Untuk gerak silinder, dengan orientasi *surge* dan *heave* dapat dilihat pada gambar 2.5. Sedangkan persamaan gaya massa tambah merupakan perkalian antara massa tambah dan percepatan gerak benda terapung dapat ditampilkan sebagai berikut.



$$F_a = a_i \ddot{\xi}_i \quad (2.4)$$

dengan,

i = mode gerak struktur dengan 1 (*surge*), 2 (*sway*), 3 (*heave*), 4 (*roll*), 5 (*pitch*) dan 6 (*yaw*)

a = massa tambah (kg)

$\ddot{\xi}$ = respon percepatan gerak struktur (m/s^2)

	SHAPE	ADDED MASS PER UNIT LENGTH
		← MOTION →
	CIRCLE	$\rho \pi c^2$
	CIRCULAR DISK	$\frac{8}{3} \rho c^3$

Gambar 2.5 Persamaan Massa Tambah Untuk Bentuk Silinder (Sarpkaya, 2010).

c. Redaman (*damping*)

Redaman merupakan dampak yang didapat akibat adanya disipasi energi dari struktur (Newman, 1997). Redaman akan membuat struktur kehilangan energi kinetiknya. Jika struktur digetarkan di air yang tenang, maka energi kinetik

struktur semakin lama semakin mengecil, hal inilah yang disebut sebagai redaman. Sama seperti massa tambah, nilai redaman bergantung dari bentuk benda dan mode gerak benda. Nilai koefisien redaman dapat dicari dengan analisa numeris (Chakrabarti, 1994).

$$F_b = b_i \dot{\xi}_i \quad (2.5)$$

dengan,

- i = mode gerak struktur dengan 1 (*surge*), 2 (*sway*), 3 (*heave*), 4 (*roll*), 5 (*pitch*) dan 6 (*yaw*)
- b = redaman sistem (N s/m)
- $\dot{\xi}$ = respon kecepatan gerak struktur (m/s)

d. Kekakuan (*Stiffness*)

Ketika struktur terapung bergerak di permukaan air tenang, struktur tersebut mempunyai kekakuan untuk kembali ke posisi semula. Kekakuan tersebut didapat dari gaya reaksi yang berfungsi untuk mengembalikan posisi benda yang disebut gaya pengembali. Fenomena ini hanya terjadi pada tiga mode gerak struktur. Mode gerak tersebut adalah gerak *heave*, *pitch* dan *roll* (Djarmiko, 2012). Gaya ini dipengaruhi oleh karakter hidrostatik struktur.

$$F_c = c_i \xi_i \quad (2.6)$$

dengan,

- i = mode gerak struktur dengan
1 (*surge*), 2 (*sway*), 3 (*heave*), 4 (*roll*), 5 (*pitch*) dan 6 (*yaw*)
- k = koefisien redaman
- ξ = respon posisi gerak struktur

Nilai c dari *heave* (c_3), *roll* (c_4) dan *pitch* (c_5) adalah sebagai berikut:

$$c_3 = \rho g A_{wp} \quad (2.7)$$

$$c_4 = \rho g V \overline{GM}_T \quad (2.8)$$

$$c_5 = \rho g V \overline{GM}_L \quad (2.9)$$

dengan,

ρ = massa jenis air sekitar struktur

g = percepatan gravitasi struktur

A_{wp} = luas permukaan di garis air

V = volume displacement struktur

\overline{GM}_T = jarak metacenter melintang

\overline{GM}_L = jarak metacenter memanjang

2.2.7 Persamaan Gerak

Untuk menganalisa gerak bangunan apung dapat menggunakan hukum II Newton sebagai berikut:

$$\sum F = m_i \ddot{\xi}_i \quad (2.10)$$

dengan,

i = mode gerak struktur dengan

1 (surge), 2 (sway), 3 (heave), 4 (roll), 5 (pitch) dan 6 (yaw)

$\sum F$ = resultan gaya

m = massa struktur

$\ddot{\xi}$ = percepatan struktur

Resultan gaya untuk benda terapung merupakan pengurangan gaya aksi dengan gaya reaksi. Hal ini dikarenakan gaya aksi (gaya eksitasi) memberi gaya kepada struktur sedangkan gaya reaksi merupakan gaya yang melawan gaya aksi. Berikut merupakan persamaan dari resultan gaya untuk benda terapung:

$$\sum F = F_{eksitasi} - F_{reaksi} \quad (2.11)$$

Dengan memasukkan pengertian gaya eksitasi dan gaya reaksi pada struktur terapung yang terkena gelombang, maka persamaan 2.11 dapat dikembangkan menjadi persamaan berikut:

$$\sum F = F_{eksitasi} - (F_a + F_b + F_c) \quad (2.12)$$

dengan,

$$\sum F = \text{resultan gaya (N)}$$

$$F_a = \text{gaya inersia (N)}$$

$$F_b = \text{gaya redaman (N)}$$

$$F_c = \text{gaya pengembali (N)}$$

Dari persamaan 2.4, 2.5, dan 2.6, yang kemudian dimasukkan ke persamaan 2.11, 2.12 maka didapatkan persamaan baru sebagai berikut:

$$m_i \ddot{\xi}_i = F_{eks} - (a_i \ddot{\xi}_i + b_i \dot{\xi}_i + c_i \xi_i) \quad (2.13)$$

$$(m_i + a_i) \ddot{\xi}_i + b_i \dot{\xi}_i + c_i \xi_i = F_{eks} \quad (2.14)$$

dengan,

$$i = \text{mode gerak struktur dengan 1 (surge), 2 (sway), 3 (heave), 4 (roll), 5 (pitch) dan 6 (yaw)}$$

$$F_{eks} = \text{gaya eksitasi gelombang (N)}$$

$$m = \text{massa struktur (kg)}$$

$$a = \text{massa tambah (kg)}$$

$$\ddot{\xi} = \text{respon percepatan gerak struktur (m/s}^2\text{)}$$

$$b = \text{nilai redaman sistem (N s/m)}$$

$$\dot{\xi} = \text{respon kecepatan gerak struktur (m/s)}$$

$$c = \text{kekakuan struktur (N/m)}$$

$$\xi = \text{respon posisi gerak struktur (m)}$$

Persamaan 2.14 merupakan persamaan yang tidak memperhatikan gerak kopel bangunan. Dalam pengertian itu, setiap mode gerak tidak mempengaruhi gerak benda yang lain. Di sisi lain, gerak kopel adalah persamaan gerak yang setiap

geraknya bisa saling mempengaruhi gerak yang lainnya. Menurut Djatmiko (1992), persamaan gerak kopel untuk kondisi terapung dapat direpresentasikan dalam bentuk matriks, dengan persamaan 2.15.

$$\sum_{n=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk})\xi_k + B_{jk}\xi_k + C_{jk}\xi_k] = F_j e^{i\omega t}, j = 1 \quad (2.15)$$

dengan,

- M_{jk} = matriks massa bangunan apung
- A_{jk} = matriks massa tambah bangunan apung
- B_{jk} = matriks redaman bangunan apung
- C_{jk} = matriks kekakuan bangunan apung
- F_j = amplitudo gaya eksitasi dalam besaran kompleks. F1, F2, dan F3 adalah amplitudo gaya-gaya eksitasi yang mengakibatkan *surge*, *sway*, dan *heave*. Sedangkan F4, F5, dan F6 adalah amplitudo momen eksitasi untuk *roll*, *pitch*, dan *yaw*.

Untuk permasalahan bangunan apung yang tertambat persamaan gerak 2.16 menjadi persamaan berikut (Chen, 2011).

$$\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^6 \left[-\omega^2 (\delta_{nm} m_{jk}^{nm} + m_a^{nm}) - i\omega c_{jk}^{nm} + \delta_{nm} k_{jk} + k_{jk}^{*nm} \right] \xi_j = F_j^n \quad (2.16)$$

dengan,

- n = 1, 2, 3, ..., M menunjukkan jumlah n^{th} struktur,
- δ_{nm} = simbol Kronecker delta, mempunyai nilai 0 jika $n \neq m$ dan 1 jika $n = m$, sehingga \mathbf{M}_{jk}^{mm} and \mathbf{C}_{jk}^{mm} adalah matriks inersia dan hidrostatis dari bangunan m^{th}
- $m a_{jk}^{nm}$ = matriks massa tambah untuk bangunan m^{th} akibat gerak bangunan sendiri ($n = m$), dan matriks massa tambah bangunan m^{th} akibat bangunan n^{th} ($n \neq m$),

- c_{jk}^{nm} = matrik redaman hidrodinamika untuk bangunan m^{th} akibat gerak bangunan sendiri ($n = m$), dan matriks redaman hidrodinamika m^{th} akibat bangunan n^{th} saat ($n \neq m$),
- k_{jk}^{*nm} = matrik kekakuan untuk bangunan m^{th} akibat gerak bangunan sendiri ($n = m$), dan matriks kekakuan m^{th} akibat bangunan n^{th} saat ($n \neq m$),
- \mathbf{F}_j^n = matriks gaya eksitasi pada bangunan n^{th} .

2.2.8 RAO (*Response Amplitude Operator*)

Response Amplitude Operator (RAO) merupakan hubungan antara amplitudo respon dengan amplitudo gelombang ($\zeta_{respon}/\zeta_{gelombang}$). RAO pada umumnya disajikan dalam bentuk grafik, dimana absisnya berupa frekuensi, sedangkan ordinatnya merupakan rasio antara amplitudo gerakan pada mode tertentu dengan amplitudo gelombang.

Respon gerakan RAO untuk gerakan translasi: *surge*, *sway*, dan *heave* ($k = 1, 2, 3$ atau x, y, z), adalah merupakan perbandingan langsung antara amplitudo gerakannya dibanding dengan amplitudo gelombang insiden (keduanya dalam satuan panjang)(Djarmiko, 2012):

$$RAO(\omega) = \left(\frac{\text{Amplitudo Respon Gerakan}}{\text{Amplitudo Gelombang}} \right) = \left(\frac{\zeta_{k0}}{\zeta_0} \right) (m/m) \quad (2.17)$$

dengan,

$$\zeta_{k0} = \text{amplitudo struktur (m)}$$

$$\zeta_0 = \text{amplitudo gelombang (m)}$$

Sedangkan respons non-dimensi atau RAO untuk gerakan rotasi: *roll*, *pitch*, dan *yaw* ($k = 3, 4, 5$ atau θ, ϕ, ψ) adalah merupakan perbandingan antara amplitudo gerakan rotasi (dalam radian) dengan kemiringan gelombang, yakni

yang merupakan perkalian antara angka gelombang, $k_w = \omega^2/g$, dengan amplitudo gelombang insiden:

$$RAO(\omega) = \frac{\zeta_{k0}}{K_w \zeta_0} = \frac{\zeta_{k0}}{(\omega^2/g)\zeta_0} \text{ (rad/rad)} \quad (2.18)$$

dengan,

ζ_{k0}	= amplitudo struktur (m)
ζ_0	= amplitudo gelombang (m)
k_w	= angka gelombang (rad/m)
ω	= frekuensi gelombang (rad/m)
g	= percepatan gravitasi (m/s ²)

2.2.9 Sistem Tambat

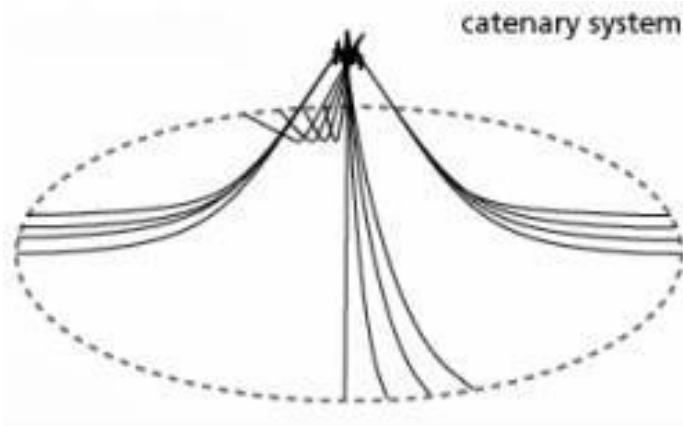
Sistem tambat pada struktur terapung lepas pantai berfungsi untuk menjaga struktur agar tetap berada pada posisi yang direncanakan ketika menerima gaya-gaya yang bekerja ketika beroperasi. Sistem tambat pada umumnya terangkai dari sejumlah tali yang berupa *chain*, *wire*, atau *synthetic rope* (Stendal, 2015). Bagian atas dari *mooring line* ini dipasang pada badan struktur terapung di titik-titik yang berbeda sedangkan bagian bawah *mooring line* nya ditambatkan ke dasar laut. Kabel-kabel *mooring* terangkai dari rantai baja (*steel chain*), tali ataupun kombinasi dari keduanya. Gaya tension yang terjadi pada kabel tergantung dari berat kabel, *property* elastisitasnya sendiri dan sistem tambatnya (Ivandito dkk, 2016).

Tipe-tipe sistem tambat yang digunakan untuk struktur SPAR sebagai berikut:

a. Sistem tambat tipe *catenary*

Sistem tambat *catenary* adalah sistem tambat yang paling umum di perairan dangkal. *Catenary* menggantung secara horisontal di dasar laut. Akibatnya panjang *catenary* harus lebih besar dari kedalaman air dan titik jangkar dalam

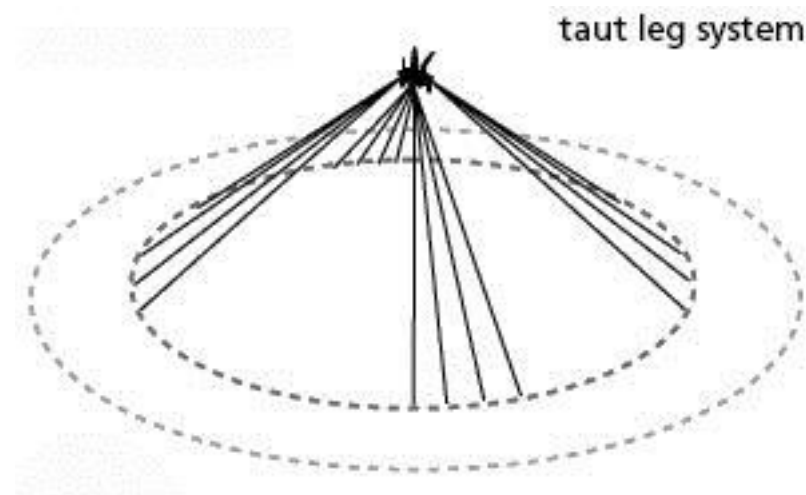
sistem tambat catenary dikenai gaya horisontal. Pada catenary mooring, gaya pengembali dihasilkan oleh berat *mooring lines* sendiri.



Gambar 2.6 *Catenary Mooring.*

b. Sistem tambat tipe *taut*

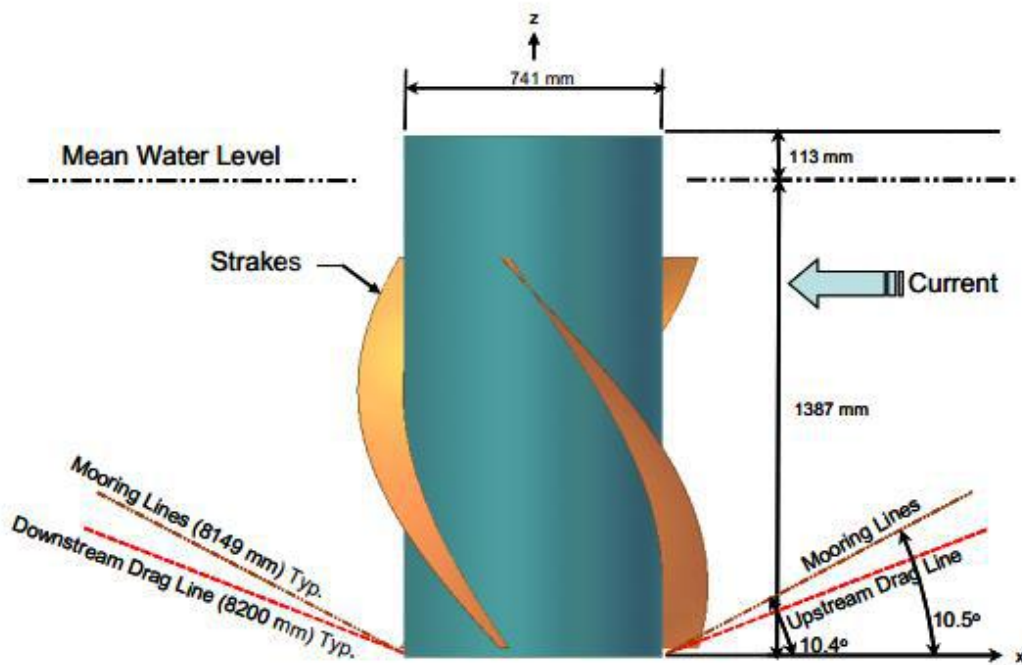
Dalam sistem tambat taut, tali tambat diberi *pre-tension* dengan sudut tertentu di dasar laut. Biasanya sudut antara garis dan dasar laut adalah antara 30 dan 40 derajat. Poin jangkar dalam sistem tambat kaki taut harus mampu menahan kekuatan horisontal dan vertikal. Pada *taut mooring*, gaya pengembali dihasilkan oleh berat *mooring lines* sendiri. Keuntungan dari *taut mooring* jika dibandingkan dengan *catenary mooring* adalah radius tambatannya lebih kecil.



Gambar 2.7 *Taut Mooring.*

2.2.10 Helical Strakes

Struktur yang menyerupai sirip disebut *strakes* yang melekat secara heliks sekitar bagian luar silinder bertindak untuk memecah aliran air terhadap struktur, lebih meningkatkan stabilitas. *Helical strakes* juga digunakan untuk menekan *Vortex Induced Motion* (VIM) dan *Vortex Induced Vibration* (VIV) pada SPAR. Menurut Wilson dan Tinsley (1989) merekomendasi diameter yang digunakan untuk helical strakes adalah 0.1 dari diameter hull SPAR. Kemudian besar sudut antara helical dengan aksis silinder adalah 60° , dan jumlah strakes adalah 3 buah dengan panjang dari helical strakes adalah 3-5 kali diameter hull SPAR.



Gambar 2.8 *Helical Strakes* (Sinirvas, 2006)

2.2.11 Teori Pemodelan

Dalam melakukan pemodelan suatu prototipe dengan skala kecil, terdapat tiga hal penting yang harus diperhatikan sehingga model dapat merepresentasikan perilaku geometri struktur, aliran fluida dan interaksi antara

keduanya. Oleh karena itu, harus dicari kesamaan dalam geometri, kinematika fluida, dan dinamika dari struktur yang dikenai oleh fluida di sekitarnya.

1. Kesamaan geometri

Dalam hal kesamaan geometri, model yang akan dibuat harus memiliki kesamaan dalam bentuk, tetapi berbeda dimensi. Model yang dibuat harus disesuaikan dengan suatu faktor skala sehingga sebanding dengan prototipe yang dijadikan acuan, terutama pada bagian yang terendam. Rasio skala tersebut dapat dengan mudah diasumsikan dengan rasio skala konstan diantara dimensi model dan prototipe.

$$\frac{l_p}{l_m} = \lambda \quad (2.19)$$

Dimana l_p dan l_m dua dimensi yang bersesuaian dari dua struktur yang dinamakan prototipe dan model, dan λ merupakan rasio skala diantara keduanya. Jika seluruh bentuk dan dimensi (diameter, panjang, dll) dari suatu model sudah sebanding dengan prototipe, maka dapat dikatakan keduanya sama secara geometri. Rasio ini selanjutnya akan digunakan sebagai faktor skala untuk model yang didefinisikan sebagai λ .

2. Kesamaan Kinematik

Dalam hal kesamaan kinematika, rasio dari kecepatan dan percepatan yang digunakan dalam model harus dijaga. Rasio dari kecepatan pada prototipe dengan kecepatan model yang bersesuaian harus konstan. Hal ini berlaku pada seluruh kecepatan termasuk kecepatan partikel fluida, angin, towing, model pada arah tertentu. Sama seperti sebelumnya, rasio dari percepatan model harus sama dengan prototipe, tetapi dengan rasio yang berbeda dengan kecepatan. Ketika percepatan dan kecepatan model sudah sama dengan prototipe, maka keduanya dapat dikatakan memiliki kesamaan kinematik.

3. Kesamaan Hidrodinamik

Hukum skala dalam kesamaan hidrodinamik ditentukan oleh rasio dari gaya. Ada beberapa hukum skala dalam kesamaan hidrodinamik berdasarkan masalah interaksi struktur dengan fluida. Kesamaan dinamik antara model dan prototipe didapatkan dengan memenuhi hukum kesamaan tersebut. Dalam kebanyakan kasus, hanya satu dari beberapa hukum skala tersebut yang dapat memenuhi model struktur. Oleh karena itu, hal penting yang perlu dipahami adalah proses fisik yang dialami oleh struktur. Kemudian memilih hukum skala yang paling penting yang mengatur proses tersebut.

4. Hukum Model Froude

Bilangan froude didefinisikan sebagai perbandingan antara gaya inersia terhadap gaya gravitasi yang dihasilkan oleh benda pada suatu medium. Bilangan froude didefinisikan dengan persamaan,

$$Fr = \frac{u^2}{(gD)} \quad (2.20)$$

Model froude harus memenuhi hubungan,

$$\frac{u_p^2}{(gD_p)} = \frac{u_m^2}{(gD_m)} \quad (2.21)$$

Dengan mengasumsikan faktor skala kesamaan geometri adalah λ , hubungan antara model dengan prototipe untuk bermacam parameter dapat diperoleh. Tabel berikut merupakan faktor skala dari variabel-variabel yang umum digunakan dan memenuhi persyaratan model Froude.

Tabel 2.1 Model to Prototype Multiplier for The Variables Commonly Used in Mechanics Under Froude Scaling (Chakrabarti, 1994).

VARIABLE	UNIT	SCALE FACTOR	REMARKS
<u>WAVE MECHANICS</u>			
Wave Height	L	λ	Consecutive crest to trough distance
Wave Period	T	$\sqrt{\lambda}$	Time between two successive crests passing a point
Wave Length	L	λ	Distance between two successive crests at a given time
Particle Velocity	LT^{-1}	$\sqrt{\lambda}$	Rate of change of movement of a water particle
Wave Elevation	L	λ	Form of wave (distance from still waterline)
Particle Acceleration	LT^{-2}	1	Rate of change of velocity of a water particle
<u>STABILITY</u>			
Displacement (Volume)	L^3	λ^3	Volume of water moved by a submerged object (or part thereof)
Natural Period	T	$\sqrt{\lambda}$	Period of free oscillation in still water due to an initial disturbance
Metacenter	L	λ	Instantaneous center of rotation
Center of Buoyancy	L	λ	Distance of C.G. of displaced volume from a fixed point

Tabel 2.2 Model to Prototype Multiplier for The Variables Commonly Used in Mechanics Under Froude Scaling lanjutan (Chakrabarti, 1994).

VARIABLE	UNIT	SCALE FACTOR	REMARKS
<u>WAVE MECHANICS</u>			
Wave Height	L	λ	Consecutive crest to trough distance

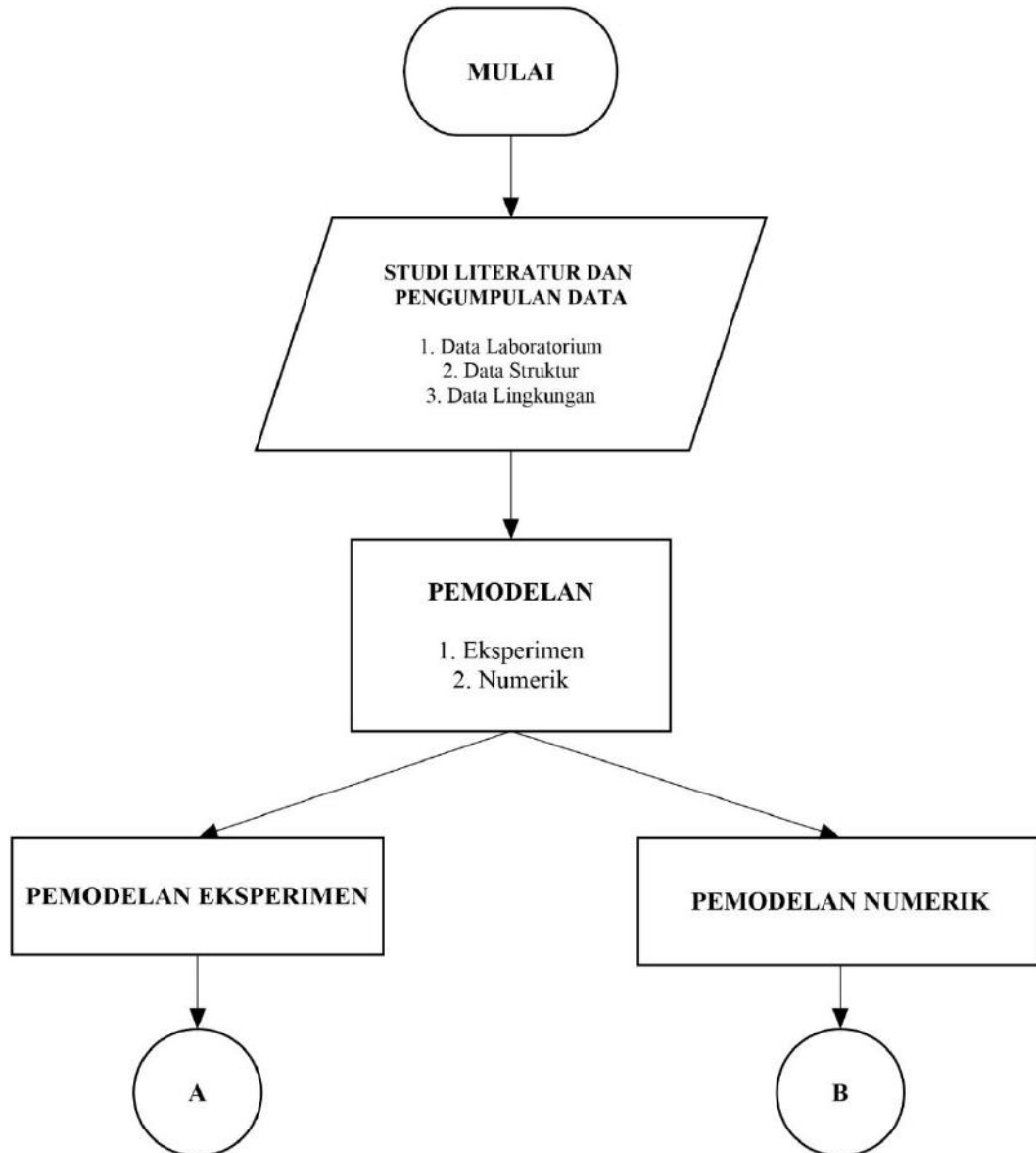
<i>Wave Period</i>	T	$\sqrt{\lambda}$	<i>Time between two successive crests passing a point</i>
<i>Wave Length</i>	L	λ	<i>Distance between two successive crests at a given time</i>
<i>Particle Velocity</i>	LT^{-1}	$\sqrt{\lambda}$	<i>Rate of change of movement of a water particle</i>
<i>Wave Elevation</i>	L	Λ	<i>Form of wave (distance from still waterline)</i>
<i>Particle Acceleration</i>	LT^{-2}	l	<i>Rate of change of velocity of a water particle</i>
<u>STABILITY</u>			
<i>Displacement (Volume)</i>	L^3	λ^3	<i>Volume of water moved by a submerged object (or part thereof)</i>
<i>Natural Period</i>	T	$\sqrt{\lambda}$	<i>Period of free oscillation in still water due to an initial disturbance</i>
<i>Metacenter</i>	L	Λ	<i>Instantaneous center of rotation</i>
<i>Center of Buoyancy</i>	L	Λ	<i>Distance of C.G. of displaced volume from a fixed point</i>

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

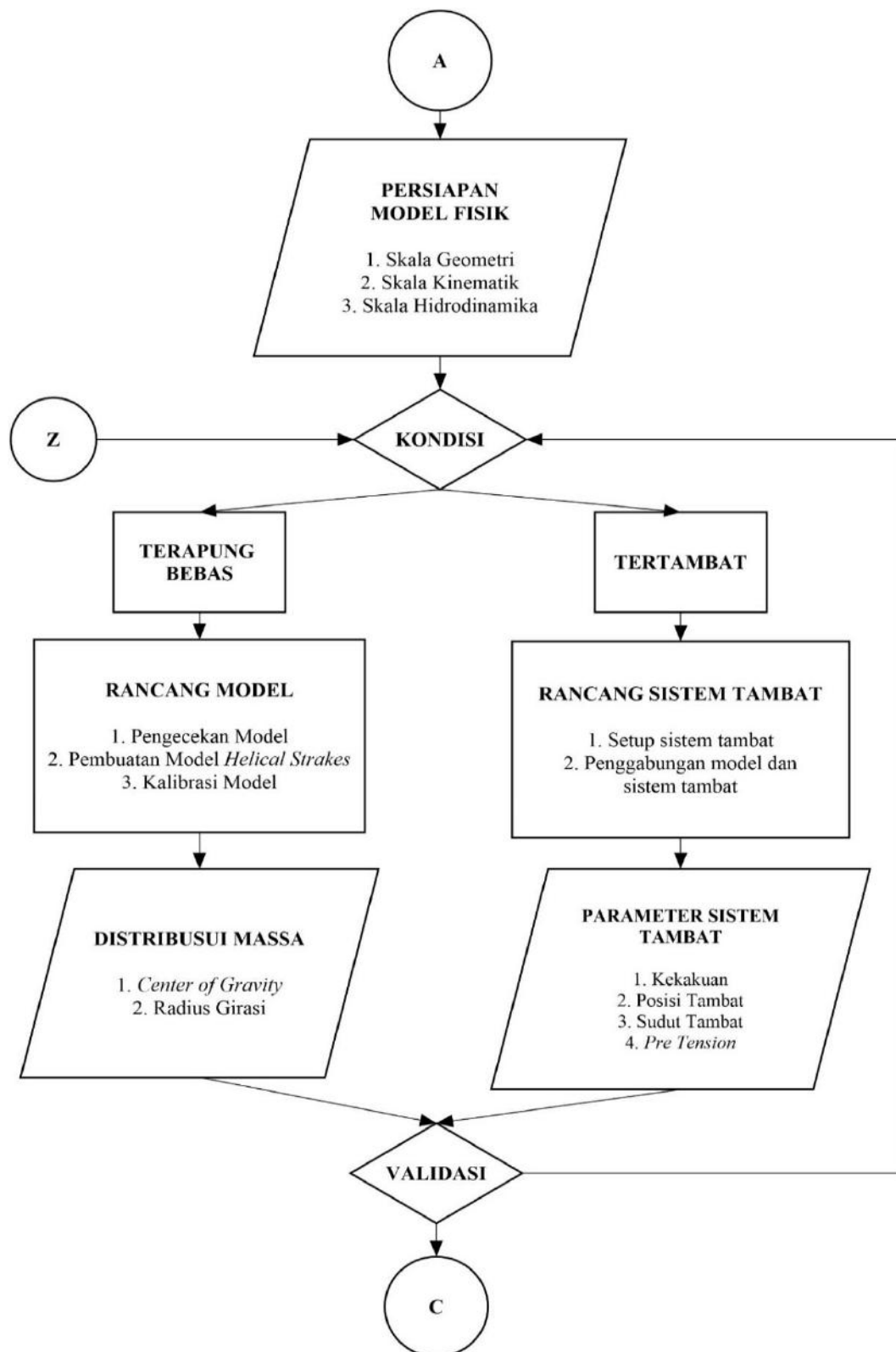
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

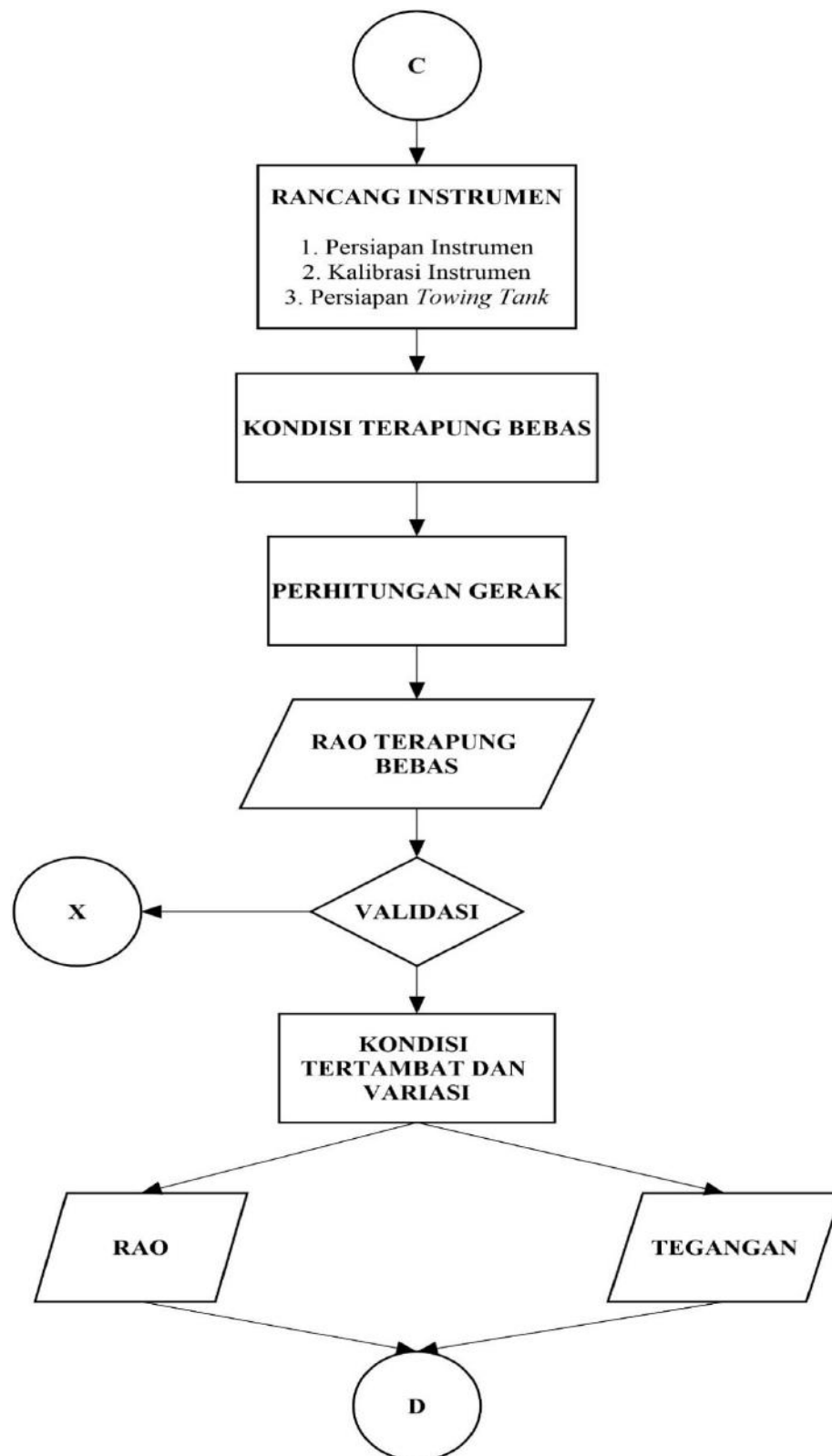
Alur pengerjaan penelitian ini dapat dijelaskan menggunakan diagram alir, berikut penjelasannya :



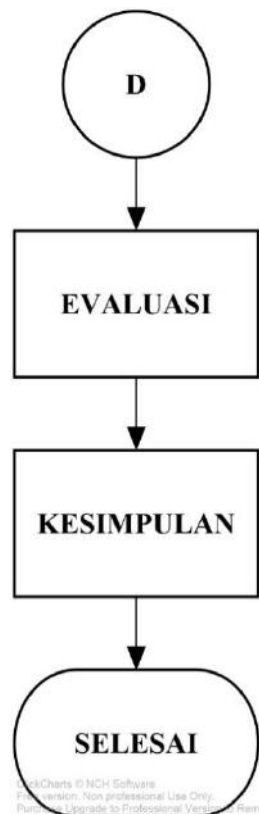
Gambar 3.1a Diagram Alir Pengerjaan.



Gambar 3.1b Diagram Alir Pengerjaan(lanjutan).



Gambar 3.1c Diagram Alir Pengerjaan(lanjutan).



Gambar 3.1d Diagram Alir Pengerjaan(lanjutan).

3.2 PENJELASAN DIAGRAM ALIR

3.2.1 Studi Literratur dan Pengumpulan Data

Penelitian ini dimulai dengan mempelajari literatur-literatur yang berhubungan dengan analisa gerak SPAR dan tegangan tali tambat dengan metode analitis, numerik dan eksperimen serta mengumpulkan data-data primer dan sekunder yang dibutuhkan dalam topik penelitian ini. SPAR yang diadaptasi dalam penelitian ini mengacu pada Mini SPAR dari laporan *Spar Model Test Joint Industry Project*. Tentunya model dimodifikasi dan diskala ulang agar sesuai dengan kemampuan Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS. Modifikasi yang dilakukan adalah penggunaan material untuk pembuatan model serta konfigurasi massa untuk validasi titik berat dan radius girasi model agar sesuai dengan Mini SPAR. Data yang digunakan yaitu data SPAR (Tabel 3.1), data laboratorium FTK ITS (Tabel 3.2), data lingkungan (Tabel 3.3), dan data helical strakes (Tabel 3.4).

Tabel 3.1. Data Mini SPAR. (Joint Industry Project, 1995)

<i>Description</i>	<i>Quantity</i>	<i>Unit</i>
<u>Hull</u>		
<i>Diameter</i>	16.00	m
<i>Draft</i>	135.03	m
<i>Length</i>	154.23	m
<i>Fairlead Depth</i>	12.74	m
<u>Deck</u>		
<i>Length</i>	50.29	m
<i>Width</i>	50.29	m
<i>Height</i>	19.57	m
<u>Mass Distribution</u>		
<i>Weight</i>	29.246	ton
<i>KG</i>	62.03	m

Tabel 3.2. Data *Towing Tank* Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS. (Jaelani, 2008)

Deskripsi	Kuantitas	Satuan
Panjang	50	m
Lebar	3	m
Kedalaman (penuh)	2	m
Kedalaman (operasi)	1.8	m
Temperatur	27	°C

Tabel 3.3. Data Lingkungan

Deskripsi	Kuantitas	Satuan
Kedalaman	225	m
Periode Gelombang	5-40	S

Tabel 3.4. Data *Helical Strakes*

Deskripsi	Kuantitas	Satuan
Diameter <i>helical strakes</i>	1,6	M
Banyak <i>helical strakes</i>	3	Buah
Sudut <i>helical strakes</i> (Axis)	67.8	°

3.2.2 Pemodelan Kondisi

Langkah selanjutnya adalah memodelkan Mini Spar. Langkah ini terdiri dari dua kondisi pemodelan yaitu kondisi terapung bebas dan kondisi tertambat. Kedua kondisi tersebut nantinya akan dianalisis melalui pemodelan eksperimen dan numerik.

3.2.3 Pemodelan Eksperimen dan Numerik

Langkah selanjutnya adalah melakukan pemodelan fisik dan numerik. Pemodelan fisik dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS sedangkan pemodelan numerik menggunakan perangkat lunak *Solidwork* dan *Ansys Aqwa*.

- Pemodelan Eksperimen

Pemodelan fisik SPAR *helical strakes* ditentukan dengan skala dari model fisik aslinya. Penskalaan ini mempertimbangkan kesamaan geometris, kinematis, dinamis, dan juga mempertimbangkan kapasitas Laboratorium Hidrodinamika ITS serta material yang terdapat di pasaran. Parameter hidrostatis dilakukan untuk mengetahui sifat-sifat badan bangunan terapung yang terendam di dalam air. Parameter tersebut dibutuhkan untuk input pemodelan numerik pada perangkat lunak *Ansys Aqwa*.

- Pemodelan Numeris

Pemodelan numeris dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *solidwork* dan *ansys aqwa*. Untuk pemodelan struktur SPAR *helical strakes* dilakukan pada perangkat lunak *solidwork* dan dimodelkan sesuai dengan dimensi struktur aslinya. Setelah dimodelkan di *solidwork* kemudian model di *import* ke perangkat lunak *ansys aqwa*. Pada *ansys aqwa* model menjadi bentuk

permukaan struktur (*surface model*) yang selanjutnya di meshing guna analisa respon dan tegangan tali.

- Validasi Model

Validasi model perlu dilakukan ketika melakukan pemodelan dalam metode numerik dan eksperimen. Error yang disyaratkan agar model menjadi valid adalah 5% terhadap data. Parameter-parameter yang perlu dilakukan validasi adalah :

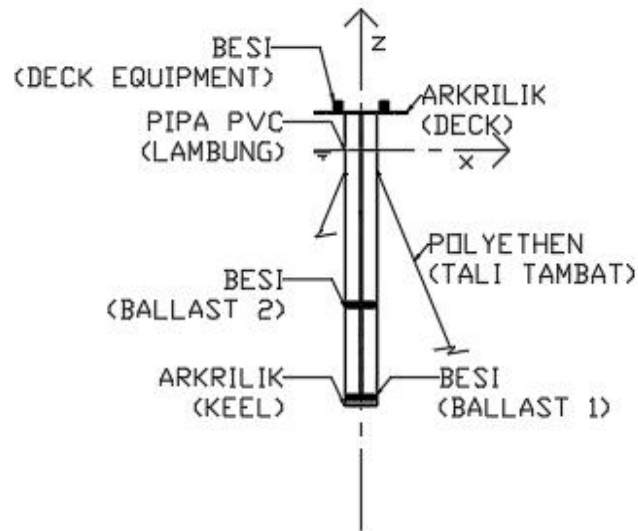
- a. *Displacement*
- b. Posisi titik berat (*Centre of Gravity*) sumbu x (LCG), sumbu y (TCG) dan sumbu z (VCG)
- c. Jari-jari girasi sumbu x (R_x), sumbu y (R_y) dan sumbu z (R_z)
- d. Jari-jari metacenter melintang (BM_T)
- e. Jari-jari metacenter memanjang (BM_L)
- f. Tinggi metacenter melintang (GM_T)
- g. Tinggi metacenter memanjang (GM_L)

Pada penelitian kali data yang harus di validasi adalah *displacement*, VCG, dan posisi *fairlead* karena hanya ketiga point tersebut yang menjadi parameter dasar. Ketiga nilai tersebut dapat ditampilkan pada hasil analisa numeris dengan *ansysaqwa*.

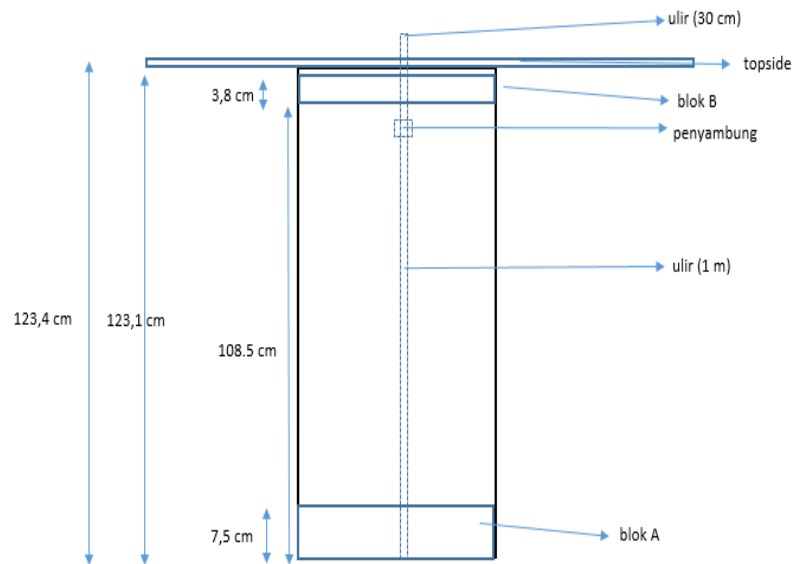
3.2.4 Rancang Model dan Sistem Tambat

Dalam tahap ini model SPAR yang digunakan adalah model mini SPAR polos yang telah di buat oleh Ivandhito dkk pada tahun 2017. Model mini SPAR yang polos kemudian dimodifikasi dengan menambahkan *helical strakes* dengan selang yang meliliti sisi bagian luar dari mini SPAR. Rancang model dan sistem tambat menggunakan material yang ada dipasaran sekitar Surabaya. Pembuatan lambung SPAR menggunakan tabung PVC dengan diameter 5 inchi, kemudian lambung ditutup dengan akrilik pada bagian bawah dan bagian geladak. Pengaturan titik berat dilakukan dengan penambahan pemberat berupa besi dengan ukuran, berat dan lokasi yang disesuaikan. Sementara untuk tali tambat menggunakan material senar pancing. Jangkar yang digunakan dibuat

dari beton cor dan besi yang dibentuk sedemikian rupa. Keterangan gambar dapat dilihat dilampiran.



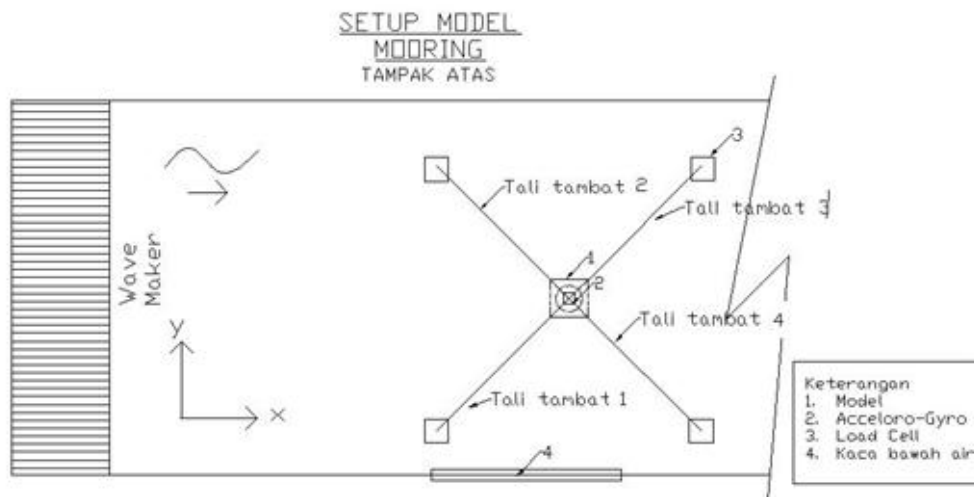
Gambar 3.2 Rencana Model SPAR.



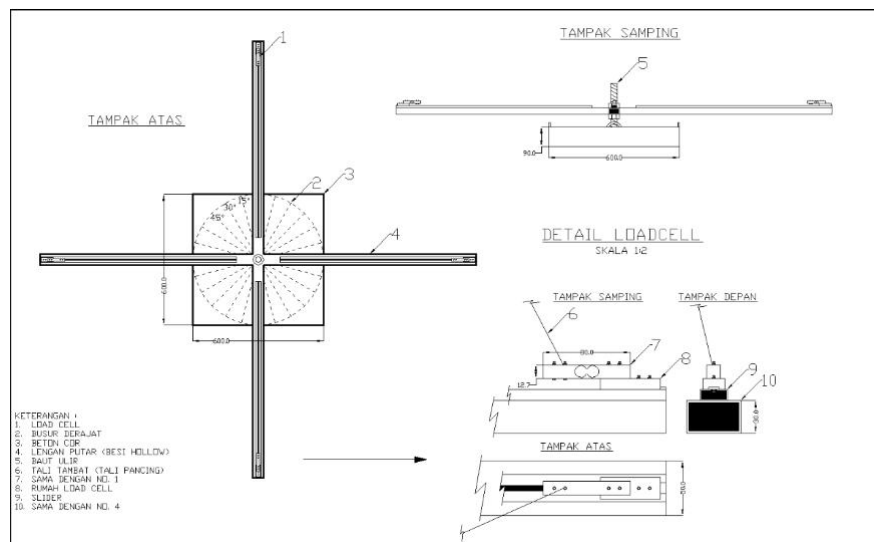
Gambar 3.3 Desain Pemberat.

Untuk *layout* sistem tambat yang digunakan dalam eksperimen ditunjukkan pada Gambar 3.4. Sistem tambat yang digunakan pada eksperimen terdiri dari

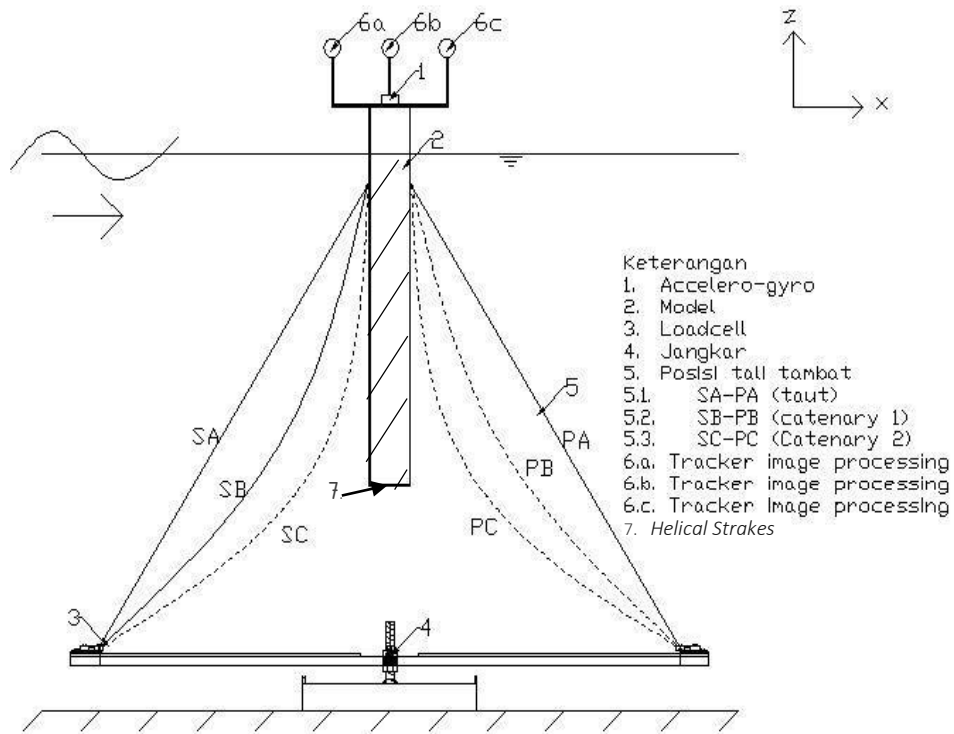
empat buah *mooring line* yang ditambatkan pada *loadcell* yang berada di jangkar di dasar kolam Laboratorium Hidrodinamika ITS dan dihubungkan pada *fairlead* struktur. Sedangkan untuk jangkar dan pemberat yang digunakan pada eksperimen dapat dilihat pada Gambar 3.5. Jangkar terbuat dari besi yang berbentuk silang dan pemberat terbuat dari beton yang berbentuk persegi. Sehingga pada saat eksperimen pada kondisi tertambat dapat dilihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3.4 Desain Sistem Tambat.



Gambar 3.5 Desain Jangkar dan Pemberat.



Gambar 3.6 Desain Model Saat Eksperimen Tertambat.

3.2.5 Parameter Tali Tambat

Parameter sistem tambat yang digunakan antara lain kekakuan tali tambat, posisi tambat, sudut tambat dan *pre-tension* tali tambat. Berikut ini merupakan penjelasan dari tiap parameter sistem tambat yang digunakan.

1. Kekakuan tali tambat

Kekakuan tali tambat dipengaruhi oleh properties dari material yang digunakan. Modulus elastisitas material mempengaruhi kekakuan tali tambat yang digunakan. Semakin besar kekakuannya, semakin besar pula periode natural dari struktur. Data properties tali tambat dari Mini SPAR dapat dilihat di Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Properties Tali Tambat dari Mini SPAR. (Joint Industry Project, 1995)

Properties tali tambat dari prototype	
Diameter luar (in)	0.0625
Kekakuan (lbs/in)	0.0726
<i>Pre-tension</i> (lbs)	2.6000

Tabel 3.6 Properties Tali Tambat Dari *Prototype* SPAR

	Model	Mini SPAR	Satuan
Length	1.96	245	M
Diameter	0.62	115	mm
Axial Stiffness (EA)	0.604	1175000	KN

2. Posisi *Fairlead*

Fairlead berfungsi untuk menghubungkan tali tambat dengan model. Posisi tambat pada model yang dianalisa adalah 10,1 cm di bawah sarat air.

3. Sudut *Fairlead*

Sudut *fairlead* dari tali tambat yang digunakan pada analisa model ini adalah sebesar 30 derajat. Sudut ini didapatkan ketika tali diatur dalam keadaan batas tegang. Batas tegang yang dimaksud adalah tali tambat lurus (tidak melengkung) dan tidak merubah sarat.

4. *Pre-tension*

Pre-tension atau tegangan tali awal yang digunakan dalam model SPAR ini di atur dalam keadaan batas tegangan yang tidak merubah sarat air.

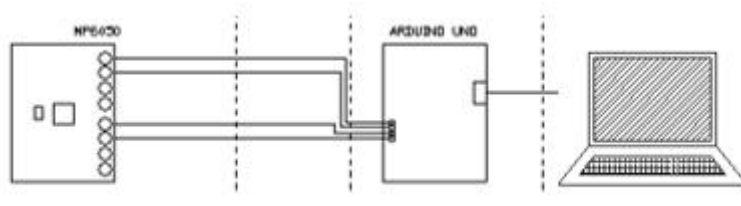
3.2.6 Rancang Instrumen

Dalam penelitian ini untuk mengukur gerak respon dari struktur menggunakan instrumen *gyroscope* dan *image processing*. Instrumen *gyroscope* digunakan untuk menghitung respon gerak rotasi dari struktur sedangkan untuk *image processing* digunakan untuk menghitung respon gerak translasi dari struktur. Untuk mengukur tegangan tali tambat pada penelitian

ini, menggunakan instrumen *load cell*. Penjelasan ketiga alat ukur dijelaskan di bawah ini :

1. *Gyroscope*

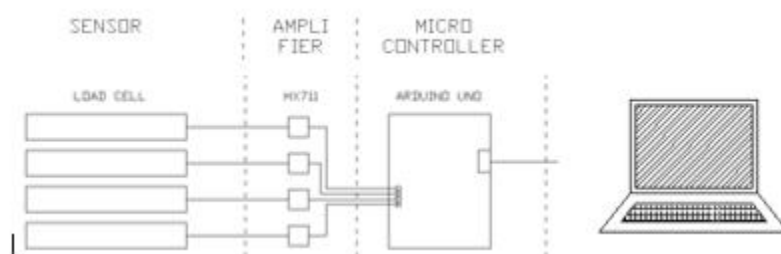
Gyroscope digunakan untuk mengukur gerak rotasi pada struktur. Alat ini diletakkan di geladak pada posisi tegak lurus dengan titik berat model. Alat ini dapat mengukur gerakan tiap satuan waktu yang ditentukan. Instrumen gyroscope yang digunakan adalah gyroscope MPU 6050 GY7. Untuk cara kerja gyroscope dapat dilihat pada gambar 3.6.



Gambar 3.7 Sistem Kerja *Gyroscope*.

2. *Load cell*

Alat ini digunakan untuk mengukur tegangan tali tambat pada saat eksperimen. Alat ini diletakkan dijangkar pada dasar kolam, kemudian dihubungkan dengan tali tambat. Cara kerja instrumen *load cell* dapat dilihat pada gambar 3.7.



Gambar 3.8 Sistem Kerja *Load Cell*.

3. *Image Processing*

Instrumen *image processing* merupakan alat berbasis C++ dengan cara kerja merekam gerakan objek dengan memasukkan video. *Image processing* memproses video dengan memisahkan video tersebut menjadi tiap *frame*. Pada tiap *frame* terdapat piksel tersebut yang direkam oleh *image processing*

menjadi ordinat x dan y. Piksel adalah unsur gambar atau representasi sebuah titik terkecil dalam sebuah gambar grafis yang dihitung per inci. Kemudian ordinat y digunakan untuk mengukur gerak *heave*, sedangkan ordinat x digunakan untuk mengukur gerak *surge*. Pada struktur dipasang tiga buah bola berwarna merah diatas *deck* yang digunakan untuk menganalisa gerak pada objek. Objek yang ditinjau adalah bola merah yang berada di titik pusat model sedangkan kedua bola merah lainnya diletakkan di ujung model yang digunakan untuk perhitungan skala pixel dan validasi data yang dihasilkan. Proses image processing ini dilakukan dengan menggunakan satu buah kamera webcam logitech c270.



Gambar 3.9 Kamera dan Bola yang Digunakan pada Eksperimen.

3.2.7 Perhitungan Gerak Numeris dan Eksperimen

1. Perhitungan Gerak Metode Numeris
 - a. Prototipe SPAR dari data penelitian JIP dimodelkan sesuai dengan dimensi yang ada menggunakan perangkat lunak *Solidwork* dan *Ansys Aqwa*.
 - b. *Displacement* merupakan massa dari struktur ditambah dengan massa tambah struktur itu sendiri. Data yang diperlukan untuk mendapatkan besar dari *displacement* struktur itu sendiri adalah nilai dari titik berat struktur, sarat struktur dan radius girasi struktur.

- c. Gaya gelombang didapatkan dari masukan frekuensi/periode gelombang yang ditinjau dimana untuk periode gelombang di laut sendiri berkisar antara 5-40 detik.
 - d. *Ansys Aqwa* akan memberikan keluaran hasil analisa berupa RAO struktur dalam keadaan *free floating* untuk tiap gerakan translasi (*surge*, *sway*, *heave*) dan rotasi (*roll*, *pitch*, *yaw*) yang terjadi untuk tiap frekuensi gelombang dan arah gelombang yang ditinjau. Sedangkan pada kondisi tertambat *Response Amplitude Operator* (RAO) yang dihasilkan *ansysaqwa* berupa *time history* tiap frekuensi.
2. Perhitungan Gerak Metode Eksperimen
- a. *Gyroscope* diletakkan di geladak dengan posisi tegak lurus titik berat model untuk mengukur gerakan *pitch*.
 - b. Model yang sudah divalidasi diletakkan di lokasi yang sudah direncanakan pada *towing tank*. Persiapan eksperimen di *towing tank* ini perlu memperhatikan ketenangan air untuk mengurangi faktor-faktor yang tidak dibutuhkan agar perhitungan dapat dianggap valid.
 - c. Dalam kondisi *free floating* juga dipasang tali penahan *drift* (*loose rope*) untuk mengakomodir gerak *drift* dari struktur akibat gelombang.
 - d. Kemudian dilakukan evaluasi apakah model sudah berada di lokasi yang direncanakan atau belum dan pastikan juga air dalam *towing tank* sudah cukup tenang untuk dilakukan *run* gelombang.
 - e. Setelah semua dipastikan sesuai dengan syarat uji *run* gelombang, maka eksperimen dapat dimulai. Jika belum sesuai, maka perlu dilakukan *setup* ulang.
 - f. Uji *run* gelombang dilakukan dalam beberapa variasi periode gelombang. Periode gelombang yang digunakan adalah 0,5 detik – 3,6 detik.
 - g. Hasil pengukuran akan disajikan dalam bentuk grafik RAO gerak.

3.2.8 Perhitungan Tegangan Numeris dan Eksperimen

1. Perhitungan Tegangan Metode Numeris

- a. Prinsip utama digunakannya sistem tambat pada struktur adalah untuk menambahkan kekakuan pada sistem struktur tersebut sehingga dapat memperkecil gerakan yang terjadi baik itu translasi maupun rotasi ketika terkena beban dari luar.
- b. *Ansys Aqwa* akan memberikan keluaran hasil analisa berupa *Response Amplitude Operator* (RAO) struktur dalam keadaan tertambat untuk tiap gerakan translasi (*surge, sway, heave*) dan rotasi (*roll, pitch, yaw*) yang terjadi untuk tiap frekuensi gelombang dan arah gelombang yang berupa *time history*.

2. Perhitungan Tegangan Metode Eksperimen

- a. Jangkar diletakkan di dasar kolam untuk mengikat tali tambat agar mendekati kondisi asli di lepas pantai yang diikatkan di dasar laut. Jangkar dilengkapi dengan *load cell* untuk mengukur tegangan tali.
- b. Pengaturan posisi jangkar dengan menggerakkan *load cell* mendekati atau menjauhi model struktur.
- c. Pengaturan *pre-tension* dilakukan dengan menarik tali sehingga mempunyai *pre-tension* yang direncanakan.
- d. Dilakukan evaluasi apakah *setup* model sudah sesuai dengan rencana atau belum. Jika belum sesuai dengan rencana penelitian, maka perlu dilakukan *setup* kembali. Jika sudah sesuai dengan rencana, maka eksperimen dapat dimulai.
- e. Selama eksperimen output dari *load cell* akan diamati untuk perhitungan gerak struktur dan tegangan tali
- f. Variasi yang dilakukan adalah salah satu tali tambat diputus tanpa merubah lokasi *load cell* pada jangkar dan lokasi *fairlead*. Variasi ini dilakukan dengan memutus salah satu tali tambat saat uji *running* gelombang. Uji *run* gelombang dilakukan pada setiap salah satu tali tambat yang direncanakan untuk diputus. Jadi misalkan saat uji *run*

gelombang pertama, tali tambat A diputus kemudian keluar hasil pengukuran. Setelah data hasil pengukuran didapatkan tali tambat A dihubungkan kembali ke posisi semula, kemudian *run* gelombang dilakukan kembali. Lalu tali tambat B diputus dan seterusnya sampai dengan semua tali tambat yang direncanakan diuji.

- g. Uji *run* gelombang dilakukan dalam beberapa variasi periode gelombang Pada saat *running* perlu diperhatikan dan diukur sejauh apa gerakan model dan seberapa besar tegangan tali tambat yang terjadi. Pada perhitungan eksperimen ini model ditinjau dalam tiga gerakan yaitu *heave*, *pitch* dan *surge*.
- h. Perhitungan tegangan tali tambat tersebut menggunakan *load cell* yang mana hasil pengukurannya dalam satuan voltase yang kemudian dikonversikan menjadi satuan tegangan. Hasil perhitungan disajikan dalam bentuk grafik RAO tegangan.

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 PEMODELAN STRUKTUR

4.1.1 Pemodelan Numerik

Pemodelan numerik dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Solidwork* dan *Ansys Aqwa*. Pemodelan numerik disesuaikan dengan dimensi dari SPAR yang diambil dari data Mini SPAR *Joint Industry Project* (1995) dengan tambahan piranti berupa *helical strakes*. Pada tabel 4.1 merupakan dimensi Mini SPAR *Joint Industry Project* yang digunakan dalam pemodelan numerik.

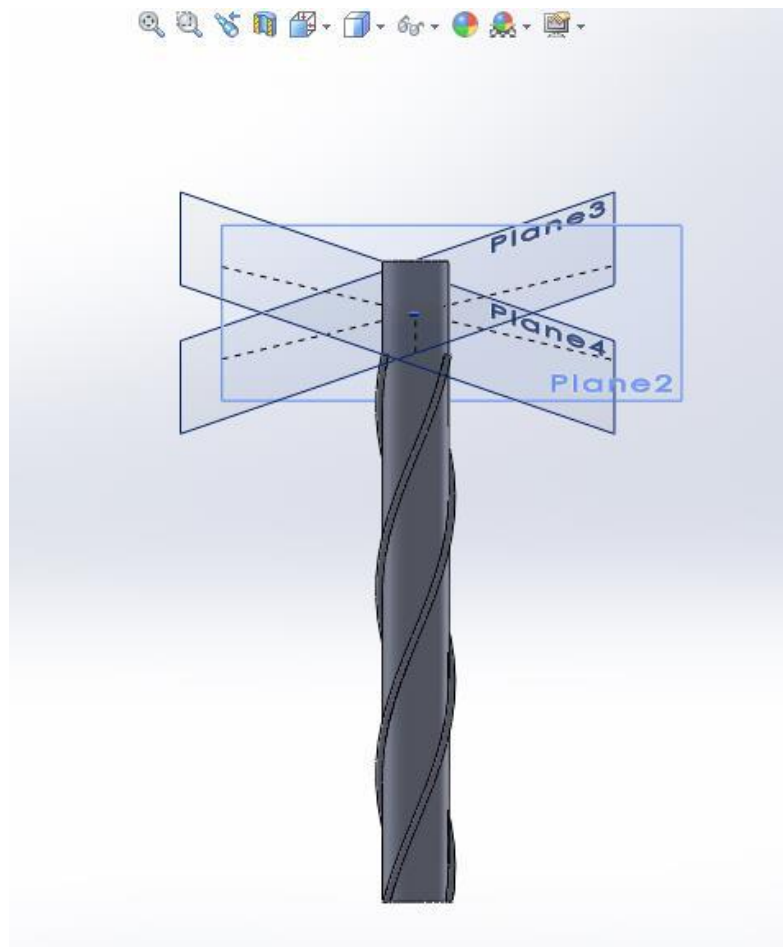
Tabel 4.1 Data Dimensi Mini SPAR (*Joint Industry Project*, 1995).

Deskripsi	Besaran
<u>Diameter</u>	
Diameter (m)	16.00
Draft (m)	135.03
Tinggi (m)	154.23
Kedalaman Posisi Fairlead (m)	12,74
<u>Deck</u>	
Panjang (m)	50.29
Lebar (m)	50.2
<u>Helical</u>	
Diameter <i>helical strakes</i> (m)	1,6
Banyak <i>helical strakes</i>	3
Sudut <i>helical strakes</i> (°)	67.08

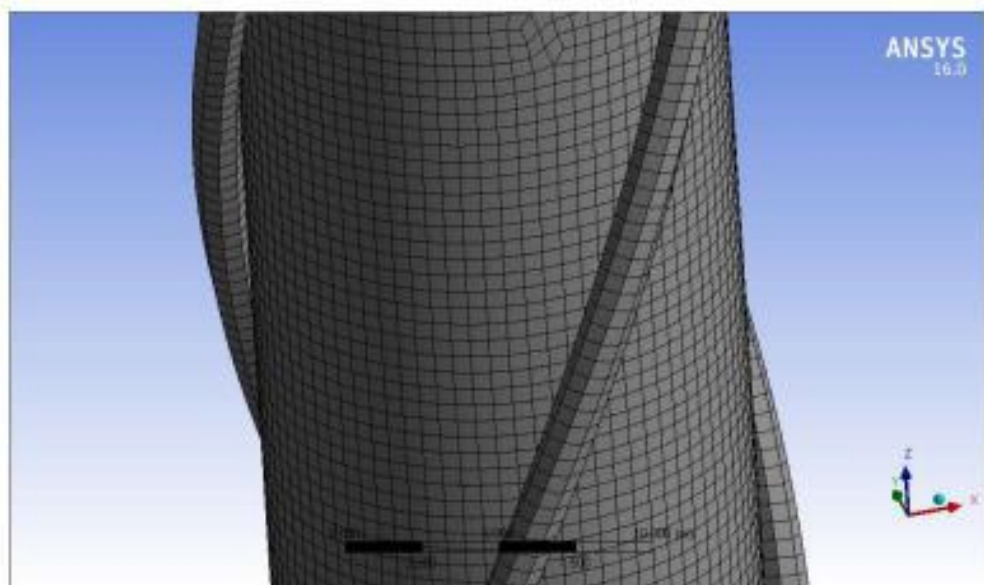
Pemodelan numerik dengan menggunakan perangkat lunak *Solidwork* dan *Ansys Aqwa* juga memerlukan *input* data berupa sarat dan jari-jari girasi. Data yang dimasukkan pada *Ansys Aqwa* sesuai dengan tabel 4.2.

Tabel 4.2 Data Distribusi Massa Mini SPAR (*Joint Industry Project, 1995*).

Deskripsi	Prototype
Massa Total (ton)	265315.2
<i>Keel to Gravity</i> (m)	62.02
Radius Girasi YY (m)	61.47
Radius Girasi XX (m)	61.47



Gambar 4.1 Pemodelan pada *Solidwork*.



Gambar 4.2 Meshing Model Pada Ansys Aqwa



Gambar 4.3 Meshing Model Tampak Depan

4.1.2 Pemodelan Eksperimen

Dalam melakukan studi eksperimen, SPAR dimodelkan menggunakan skala 1:125. Proses penskalaan yang dilakukan mengikuti aturan Froude sesuai Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil Penskalaan Model SPAR.

Deskripsi	Prototype	Faktor skala	Model
Massa (kg)	26531524.910	λ^3	13.584
Diameter (m)	16.000	λ	0.128
Sarat (m)	135.010	λ	1.080
Panjang (m)	154.210	λ	1.234
Keel to Gravity (m)	62.022	λ	0.496
Radius Girasi YY (m)	61.470	λ	0.492
Radius Girasi XX (m)	61.470	λ	0.492
Periode gelombang (s)	40, 35, 30, 25, 20, 10, 5.5	$\lambda^{1/2}$	3.6, 3.1, 2.7, 2.2, 1.8, 0.9, 0.5

Pipa yang digunakan sebagai lambung yaitu pipa PVC 5” karena menyesuaikan dengan ukuran dari diameter dari model. Pipa di ukur dan dipotong sesuai dengan hasil penskalaan. Untuk bagian bawah pipa PVC ditutup menggunakan akrilik yang ditempelkan menggunakan lem lalu didempul agar tidak bocor. Setelah dimensi utama dari model fisik terpenuhi, distribusi massa dari model fisik juga dimodelkan. Distribusi massa dari SPAR terdapat pada Tabel 4.2. Di dalam lambung model fisik diberi besi ulir dan silinder untuk mengatur distribusi beban dari model fisik dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Ulir dan Silinder Pejal di dalam Lambung Model Fisik.



Gambar 4.5 Model Fisik Tampak Depan

Langkah-langkah yang dilakukan untuk mendapatkan distribusi massa yang diinginkan adalah sebagai berikut:

1. Menghitung massa total

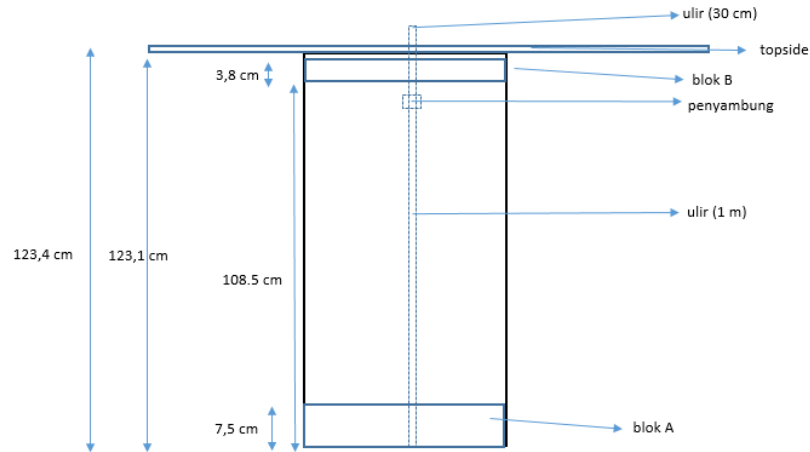
Setiap material model yang digunakan ditimbang untuk mendapatkan massa total struktur. Proses menimbang material dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah Departemen Teknik Kelautan, hasil penimbangan yang didapat ditampilkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil Penimbangan Berat Material.

Bagian		Tebal (cm)	Berat (g)	Jumlah	Total (g)
Blok A	Ballast 1	2	1628.49	1	1628.49
	Ballast 2	2	1623.09	1	1623.09
	Ballast 3	2.5	2094.09	1	2094.09
	Ballast 4	1	663.59	1	663.59
	Cap	0.3	47.46	1	47.46
Blok B	Ballast 1	2.5	2096.69	1	2096.69
	Ballast 2	0.8	465.99	1	465.99
	Ballast 3	0.5	179.49	1	179.49
Topside		0.3	599.50	1	599.50
Tambahan	Ulir (130 cm)		352.09	1	352.09
	Pipa	-	4087.53	1	4087.53
	Penyambung	-		1	0.00
	Helical Strakes		96.64	3	289.91
	Mur	-		2	0.00
Total					14127.93

2. Distribusi beban untuk pemenuhan jari-jari girasi

Setiap material yang digunakan dihitung momen inersia massanya. Kemudian dari masing-masing momen inersia material digabungkan untuk dicari momen inersia massa total. Momen inersia massa total yang didapatkan digunakan untuk menghitung jari-jari girasi model fisik.



Gambar 4.6 Desain Pemberat dan Ulir.

Perhitungan dari setiap blok sebagai berikut:

a. Pipa PVC (Silinder Berongga)

Persamaan 4.1 merupakan persamaan momen inersia massa dari silinder berongga relatif terhadap pusat massanya dengan I_{ox} merupakan momen inersia massa gerakan roll, I_{oy} merupakan momen inersia massa gerakan *pitch*, m merupakan masa benda, r merupakan radius silinder dan l merupakan panjang silinder.

$$I_{ox} = I_{oy} = \frac{1}{12} m (6r^2 + l^2) \quad (4.1)$$

Tabel 4.5 Perhitungan Momen Inersia Massa PVC.

Komponen	Berat (g)	I_{ox} (g.cm ²)	I_{oy} (g.cm ²)
PVC	4087.53	5287070.00	5287070.00

b. Blok A (Lingkaran Pejal)

Blok A terdiri dari material-material yang berbentuk silinder pejal. Persamaan 4.2 digunakan untuk menghitung momen inersia massa dari silinder pejal relatif terhadap pusat massanya dengan I_{ox} merupakan momen inersia massa gerakan *roll*, I_{oy} merupakan momen inersia massa gerakan *pitch*, m merupakan masa benda, r merupakan radius silinder dan l merupakan panjang silinder.

$$I_{ox} = I_{oy} = \frac{1}{12} m (3r^2 + l^2) \quad (4.2)$$

Blok A terdiri dari pemberat berbahan besi dan *cap* berbahan akrilik. Ukuran dan hasil perhitungan material-material di blok A terlampir di Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Perhitungan Momen Inersia Massa Blok A.

Komponen	Berat (g)	I_{ox} (g.cm ²)	I_{oy} (g.cm ²)
<i>Ballast 1</i>	1628.49	16446.05	16446.05
<i>Ballast 2</i>	1623.09	16391.52	16391.52
<i>Ballast 3</i>	2094.09	20624.60	20624.60
<i>Ballast 4</i>	663.59	6825.99	6825.99
<i>Cap</i>	47.46	471.32	471.32

c. Blok B (Lingkaran Pejal)

Blok B terdiri dari material-material yang berbentuk silinder pejal, sehingga persamaan yang digunakan sama dengan perhitungan blok A (Persamaan 4.2). Blok B hanya terdiri dari pemberat berbahan besi. Ukuran dan hasil perhitungan material-material di blok B terlampir di Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Perhitungan Momen Inersia Massa Blok B.

Komponen	Berat (g)	I_{ox} (g.cm ²)	I_{oy} (g.cm ²)
<i>Ballast 5</i>	2096.7	20748.49	20748.49
<i>Ballast 6</i>	465.99	4556.90	4556.90
<i>Ballast 7</i>	179.49	1756.57	1756.57

d. Topside

Topside terdiri dari geladak berbahan akrilik. Bentuk dari geladak merupakan balok dengan panjang 40 cm, lebar 40 cm dan tebal 0.3 cm. Persamaan 4.3 digunakan untuk menghitung momen inersia massa dari topside relatif terhadap pusat massanya dengan I_{ox} merupakan momen inersia massa gerakan *roll*, I_{oy} merupakan momen inersia massa gerakan *pitch*, m merupakan masa benda, p merupakan panjang balok, l merupakan lebar balok dan t merupakan tebal balok.

$$I_{ox} = \frac{1}{12} m (l^2 + t^2) \quad (4.3a)$$

$$I_{oy} = \frac{1}{12} m (p^2 + t^2) \quad (4.3b)$$

Tabel 4.8 Perhitungan Momen Inersia Massa *Topside*.

Komponen	Berat (g)	I_{ox} (g.cm ²)	I_{oy} (g.cm ²)
Geladak	599.5	79937.8	79937.8

e. Ulir

Pemberat blok A dan blok B dimasukkan ke dalam ulir. Ulir merupakan baut yang berbentuk silinder pejal sehingga untuk menghitung momen inersia massanya dapat menggunakan persamaan 4.2. Hasil perhitungan momen inersia dari ulir ditampilkan pada Tabel 4.9

Tabel 4.9 Perhitungan Momen Inersia Massa Ulir.

Komponen	Berat (g)	I_{ox} (g.cm ²)	I_{oy} (g.cm ²)
Ulir	352.09	495873.99	495873.99

f. *Helical Strakes*

Helical strakes terbuat dari selang plastik dengan panjang 117 setiap *pitchnya*. *Helical strakes* terbuat dari selang plastik yang dililitkan pada lambung luar model SPAR dengan satu kali lilitan sebanyak 3 buah *strakes* yang digunakan dalam pemodelan. *Helical strakes* dalam pemodelan ini berbentuk silinder pejal. Momen inersia *helical strakes* ditampilkan pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Perhitungan Momen Inersia Massa *Helical Strakes*.

Komponen	Berat (g)	$I_{ox} \text{ (g.cm}^2\text{)}$	$I_{oy} \text{ (g.cm}^2\text{)}$
<i>Helical Strakes</i>	352.09	101469.24	101469.24

Tabel 4.11 menunjukkan posisi material dengan sumbu 0 di x (*centerline*), y (*midship*) dan z (*keel*). Tabel 4.12 merupakan hasil perhitungan pusat massa model.

Tabel 4.11 Posisi Pusat Massa dari Setiap Material yang Dipakai.

		Berat (g)	LCG (cm)	TCG (cm)	VCG (cm)
Blok A	<i>Cap</i>	47.46	0.00	0.00	0.15
	Ballast 1	1628.5	0.00	0.00	6.50
	Ballast 2	1623.1	0.00	0.00	4.50
	Ballast 3	2094.1	0.00	0.00	3.0
	Ballast 4	663.59	0.00	0.00	1.25
Blok B	Ballast 5	2096.7	0.00	0.00	109.75
	Ballast 6	465.99	0.00	0.00	111.40
	Ballast 7	179.49	0.00	0.00	112.05
Tambahan	Topside	599.50	0.00	0.00	123.55
	Ulir (130 cm)	352.09	0.00	0.00	65.30
	<i>Helical 1</i>	96.64	7,75	0	54
	<i>Helical 2</i>	96.64	4,25	6,81	54
	<i>Helical 3</i>	96.64	4,25	6,81	54
PVC	PVC	4087.5	0.00	0.00	61.70
	Total	14127.93			

Tabel 4.12 Pusat Massa Model.

LCG (cm)	TCG (cm)	VCG (cm)
0.00	0.00	49.11

Setelah pusat massa dari model diketahui, momen inersia massa relatif terhadap pusat masa dapat dicari.. Jari-jari girasi dapat dicari dengan momen inersia masa yang diketahui, sesuai dengan persamaan 4.4. Tabel 4.13 menampilkan hasil jari-jari girasi dari model.

$$Jari - jari\ girasi = \sqrt{\frac{Inersia\ massa\ total\ gerak\ yang\ ditinjau}{massa\ total\ model}} \quad (4.4)$$

Tabel 4.13 Jari-jari Girasi Model.

<i>Rxx</i> (cm)	<i>Ryy</i> (cm)
48.21	48.21

Tabel 4.12 dan Tabel 4.13 merupakan nilai target dari pusat massa dan jari-jari girasi dari model fisik. Setelah model dibuat, nilai-nilai tersebut perlu divalidasi pada model yang sudah jadi. Tabel 4.14 di bawah ini merupakan perbandingan dari distribusi massa hasil skala dengan nilai target hasil perhitungan.

Tabel 4.14 Perbandingan Distribusi Massa Hasil Skala dengan Hasil Perhitungan.

Deskripsi	Model Fisik		Hasil Perhitungan		Error (%)
	Besaran	Satuan	Besaran	Satuan	
Massa Total	13.58	Kg	14.127	kg	4.04 %
<i>Keel to Gravity</i> (KG)	49.6	cm	49.11	cm	1%
Jari-jari girasi gerak <i>pitch</i>	49.2	cm	48.21	cm	1.97%
Jari-jari girasi gerak <i>roll</i>	49.2	cm	48.21	cm	1.97%

4.2 VALIDASI MODEL NUMERIK

Model yang dibuat di *Ansys Aqwa* dapat dilihat parameter hidrostatiknya dan distribusi massanya. Parameter ini yang akan digunakan untuk memvalidasi model fisik, sehingga bisa dilakukan analisa. Pada penelitian ini batas maksimum error yang diijinkan adalah 5 %. Tabel 4.15 menampilkan perbandingan antara model numerik dan data..

Tabel 4.15 Perbandingan dan Validasi Model Numerik dengan Data.

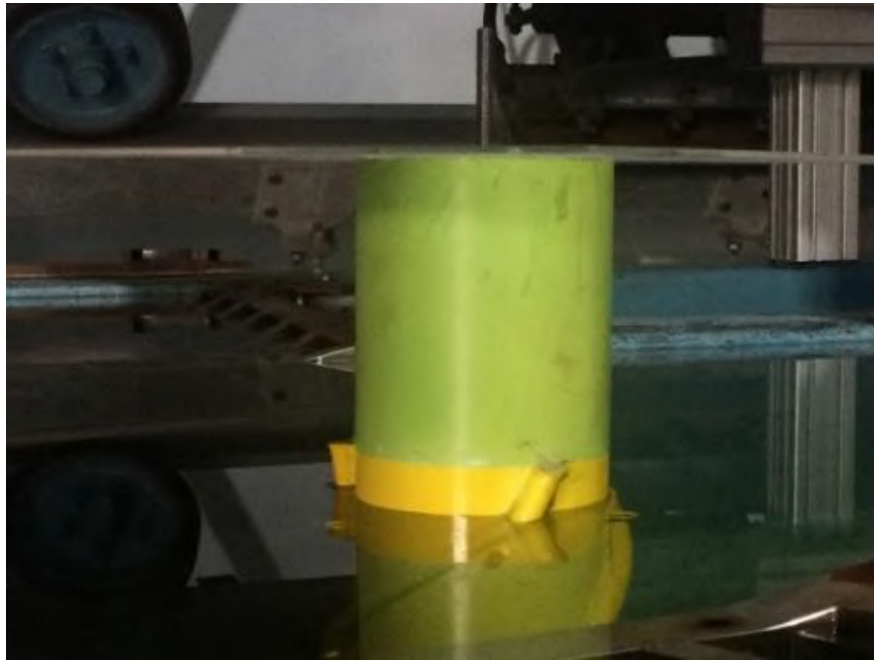
	Prototype		Model Numerik		Error (%)
Diameter	16.00	m	16.00	m	0.00
Draft	135.03	m	135.03	m	0.00
Length	154.23	m	154.23	m	0.00
Fairlead depth	12.74	m	12.74	m	0.00
Weight	26531524.91	kg	27072369	kg	2.04
KG	62.03	m	62.03	m	0.00
Roll Gyration	61.48	m	59.26	m	3.61
Pitch Gyration	61.48	m	59.26	m	3.61
Mooring Diameter			115	mm	
Mooring Stiffness (EA)			1175	MN	

4.3 VALIDASI MODEL EKSPERIMEN

Model fisik yang sudah dibuat dilakukan validasi, untuk mengetahui model tersebut sudah sesuai dengan penskalaan. Pada penelitian ini batas maksimum error yang diijinkan adalah 5 %. Hal yang perlu untuk di validasi adalah:

1. Massa Total

Massa total dapat dihitung dengan meninjau sarat (*draft*) model ketika kondisi terapung. Berat model dapat dihitung sebagai perkalian antara volume tercelup dan massa jenis air, sehingga didapat *displacement* model sebesar 14 kg.

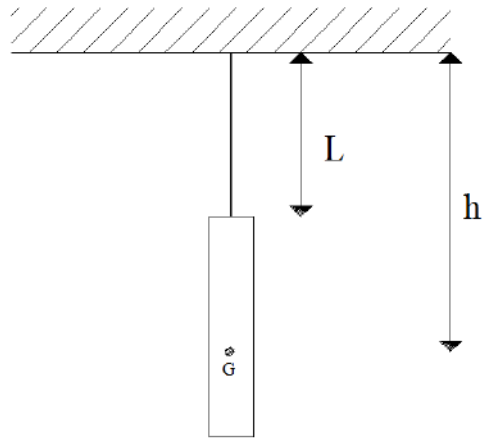


Gambar 4.7 Sarat Model SPAR *Helical Strakes*.

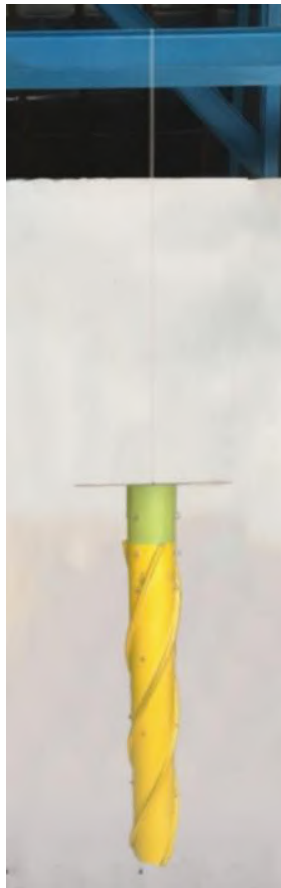
2. Jarak KG dan Jari-jari Girasi

Jarak KG dan jari-jari girasi pada struktur dihitung dengan melakukan tes pendulum pada struktur. Tes pendulum merupakan tes mengayunkan model dan menghitung periode dari ayunan struktur. Tes dilakukan dengan dua kondisi, kondisi 1 merupakan kondisi model tanpa massa tambahan, sedangkan kondisi 2 merupakan kondisi model dan pemberat pada jarak tertentu.

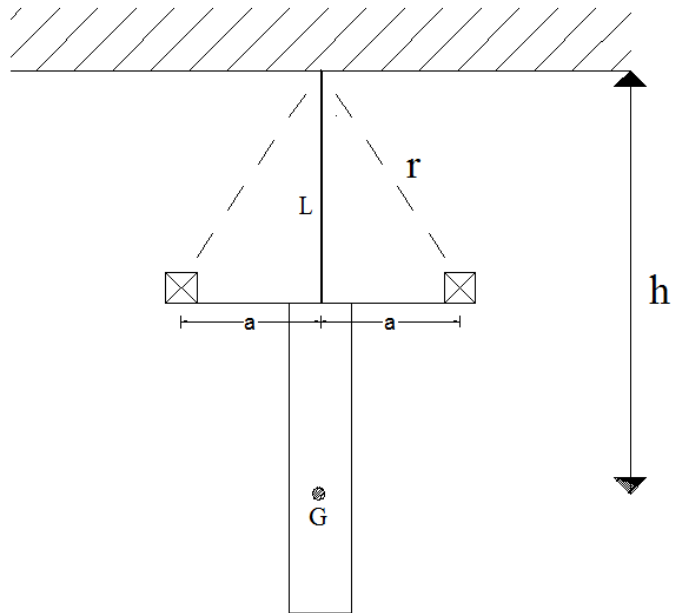
Pemberat yang dipakai merupakan plastisin yang telah dihitung beratnya di Laboratorium Mekanika Tanah Teknik Kelautan. Pada setiap kondisi dicatat periode ayunannya. Periode yang didapat kemudian digunakan untuk mencari KG dan jari-jari girasi. Skenario tes pendulum untuk kondisi 1 dan kondisi 2 dapat dilihat pada Gambar 4.8 dan Gambar 4.10. Ukuran-ukuran yang dipakai untuk tes pendulum terdapat pada Tabel 4.16 berikut ini.



Gambar 4.8 Skenario Tes Pendulum Kondisi 1 Perhitungan Jari-Jari Girasi.



Gambar 4.9 Tes Pendulum Kondisi 1.



Gambar 4.10 Skenario Tes Pendulum Kondisi 2 Perhitungan Jari-Jari Girasi.



Gambar 4.11 Tes Pendulum Kondisi 2.

Tabel 4.16 Ukuran-Ukuran yang Digunakan pada Tes Pendulum.

1.	Berat Model (m)	14	Kg
2.	Percepatan gravitasi (g)	9.81	m/s ²
3.	Jarak massa tambah (a)	0.1525	m (dari titik pusat model)
4.	Berat massa tambah (m _a)	1.552	Kg
5.	Panjang tali (L)	2.178	M
6.	Panjang tali terhadap jarak massa tambah (r)	2.1836	M

Tes pendulum dilakukan sebanyak 50 kali. Hasil pengukuran dari periode gerak pendulum model fisik pada kondisi 1 dan kondisi 2 disajikan dalam LAMPIRAN. Rata-rata periode yang didapat ditampilkan dalam Tabel 4.17.

Tabel 4.17 Periode dan Frekuensi Gerak Pendulum Model Kondisi 1 dan 2.

1.	Periode gerak tanpa massa tambah (T ₀)	3.4752	Detik
2.	Periode gerak dengan masa tambah (T ₁)	3.434	Detik
3.	Frekuensi tanpa massa tambah (ω ₀)	1.81298	rad/s
4.	Frekuensi dengan massa tambah (ω ₁)	1.82991	rad/s

Dari data-data pada Tabel 4.17 dapat ditentukan jarak dari titik tumpuan tali ke titik berat model (h) dengan menggunakan persamaan 4.5.

$$h = \frac{2m(r^2\omega_1^2 - Lg)}{\left[1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_0}\right)^2\right]Mg}$$
$$h = 2.90023 \text{ m}$$

Dari hasil perhitungan diatas, dapat diketahui titik berat model adalah sebagai berikut :

KG = panjang total (dari ujung tali sampai keel) - h

KG = 341.2 – 290.023

KG = 51.17 cm dari keel

Dari hasil perhitungan di atas, dapat ditentukan momen inersia massa gerak *pitch* dan *roll* model fisik terhadap titik gantung dengan persamaan 4.6.

$$I_{44} = I_{55} = \frac{mgh}{\omega_0^2}$$
$$I_{44} = I_{55} = 142.1579 \text{ kg.m}^2$$

Kemudian dapat ditentukan momen inersia massa gerak *pitch* dan *roll* model relatif terhadap titik berat dengan Persamaan 4.7.

$$I_m = I - mh^2 \quad (4.7)$$

$$I_m = 4.0127 \text{ kgm}^2$$

Nilai momen inersia yang diketahui dapat digunakan untuk mencari jari-jari girasi sesuai dengan Persamaan 4.8.

$$Radius \text{ girasi} = \sqrt{\frac{I_m}{m}} \quad (4.8)$$

$$Radius \text{ girasi} = 0.49461 \text{ m}$$

Karena massa terdistribusi merata relatif terhadap sumbu z, maka radius girasi *pitch* dan *roll* adalah identik dengan nilai 49.461 cm.

Tabel 4.18 Validasi Model Fisik.

	Data		Target		Tercapai		Error
Diameter	16.00	m	12.80	cm	12.80	cm	0.0 %
<i>Draft</i>	135.03	m	108.00	cm	105.4	cm	0.241%
Length	154.23	m	123.4	cm	123.40	cm	0.0 %
<i>Fairlead Depth</i>	12.74	m	10.2	cm	10.20	cm	0.0 %
Weight	26531524.91	Kg	13.58	kg	14	Kg	3.09 %
KG	62.03	m	49.6	cm	51.178	cm	3.18%
Roll Gyrasi	61.48	m	49.2	cm	49.461	cm	0.531 %
<i>Pitch Girasi</i>	61.48	m	49.2	cm	49.461	cm	0.531 %

4.4 PEMODELAN TALI TAMBAT

Pemodelan tali tambat pada penelitian ini mengacu pada katalog dari Balmoral Marine (2010) yang berisi properties *mooring equipment* seperti jangkar, rantai, *wire rope* dan lain-lain. Pada penelitian ini tali tambat yang digunakan adalah tali *wire rope* yang memiliki properti dalam Tabel 4.16.

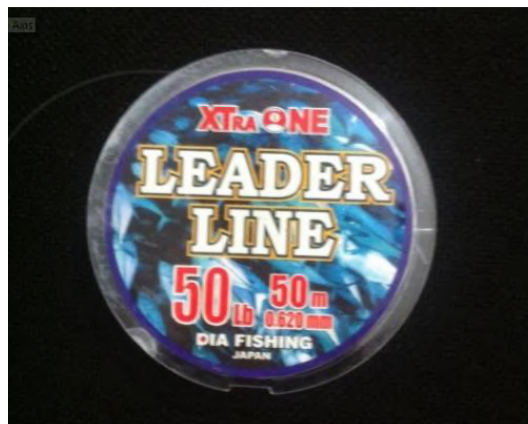
Tabel 4.19 Properti *Mooring Line*.

Diameter	115	mm
Masa jenis (udara)	65	kg/m
Masa jenis (air)	55	kg/m
MBL	11760	KN
Kekakuan	1175	MN

Tali tambat yang sudah ditentukan kemudian diskala menjadi dimensi eksperimen. Bahan yang digunakan di sini adalah senar pancing yang menggunakan bahan nilon, dengan propertiesnya adalah sebagai berikut:

Tabel 4.20 Spesifikasi Tali Tambat Eksperimen.

Keterangan	Simbol	Model (tali pancing)	Satuan
Modulus elastisitas	E	2000000000	N/m ²
Diameter tali	D	0.62	Mm
Luas Tali	A	0.3019	mm ²
Panjang Tali	L	1.8	M



Gambar 4.12 Bahan Tali Tambat.

Penskalaan dilakukan kembali pada senar pancing untuk mendapatkan spesifikasi tali tambat yang digunakan, maka dari hasil skala didapatkan properties tali tambat adalah sebagai berikut:

Tabel 4.21 Spesifikasi Tali Tambat Model Fisik.

Keterangan	Simbol	Model (tali pancing)	Satuan
Modulus elastisitas	E	250000000000	N/m ²
Diameter tali	D	77.50	Mm
Luas Tali	A	4717.30	mm ²
Panjang Tali	L	225	M

Kekakuan tali tambat model hasil penskalaan dapat dihitung dengan Persamaan 4.9.

$$K = E \times A \quad (4.9)$$

$$K = 250,000 \text{ MN/m}^2 \times 0.00472 \text{ m}^2$$

$$K = 1,179.32 \text{ MN}$$

Validasi dilakukan dengan membandingkan kekakuan *wire rope* yang ada pada katalog Balmoral Marine (2010) dengan senar. Hasil perbandingannya adalah sebagai berikut:

Tabel 4.22 Perbandingan Kekakuan *Prototype* dengan *Wire Rope* Acuan.

<i>Stiffness model asli</i> (MN)	<i>Stiffness wire rope acuan</i> (MN)	Error (%)
1179,32	1175	0,37

4.5 INSTRUMEN

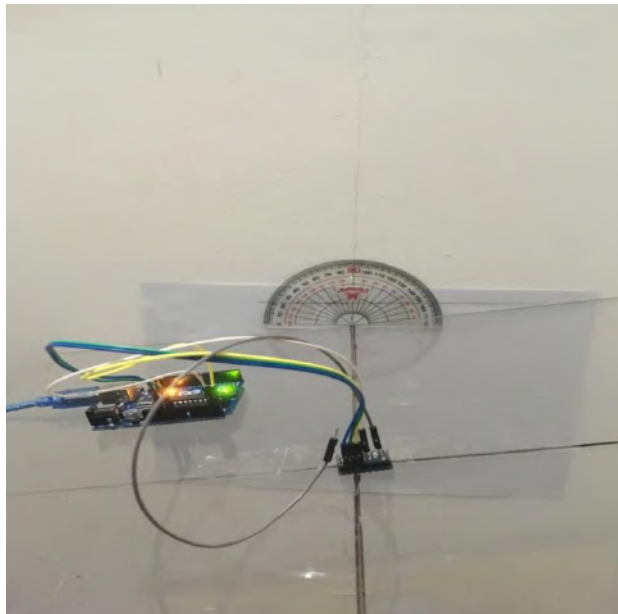
Pada saat melakukan uji eksperimen diperlukan instrumen yang digunakan untuk mengukur gerak struktur dan tegangan tali dari model fisik. Pengukuran gerak yang membentuk sudut (rotasi) menggunakan *gyroscope*, untuk gerak translasi menggunakan *image processing*, sedangkan untuk tegangan tali menggunakan *loadcell*. Sebelum melakukan pengukuran, instrumen tersebut harus dilakukan kalibrasi.

4.5.1 Kalibrasi *Gyroscope*

Instrumen *gyroscope* pada saat uji eksperimen digunakan untuk mengukur gerak rotasional sumbu y (*pitch*). Instrumen ini mampu mengukur sudut yang dibentuk oleh gerakan respon struktur. Tegangan yang sudah diamplifikasi akan diterima oleh *microcontroller* Arduino UNO (gambar 4.13) untuk kemudian ditransfer ke laptop dalam angka-angka digital. Pada saat eksperimen, instrumen *gyroscope* diletakkan pada bagian geladak pada model fisik (gambar 4.14).

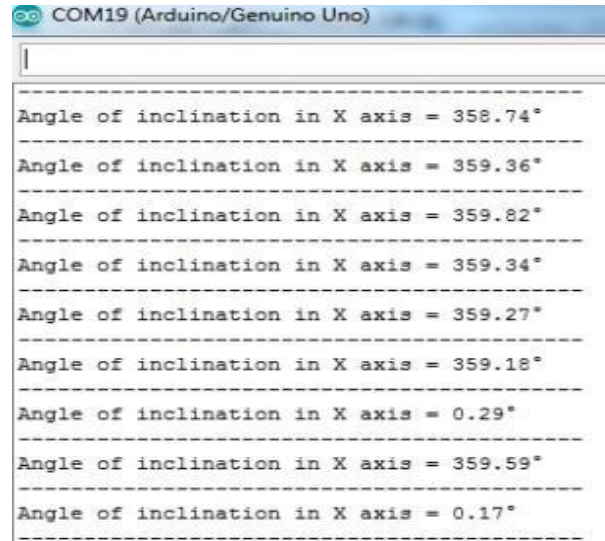


Gambar 4.13 Arduino UNO dan *Gyroscope*.



Gambar 4.14 *Gyroscope* dan Geladak saat Proses Kalibrasi.

Kalibrasi gyroscope dilakukan untuk menyesuaikan nilai keluaran dari sensor dengan nilai sudut yang terjadi (gambar 4.15). Kalibrasi dilakukan pada sudut, 0° , 10° , 20° , 30° , 40° , 50° , 60° di atas meja dengan bantuan busur. Proses ini dilakukan dengan dua arah pengukuran yaitu searah dan berlawanan jarum jam relatif terhadap *gyroscope*.



Gambar 4.15 Keluaran Arduino UNO pada Sudut 0° Searah Jarum Jam.

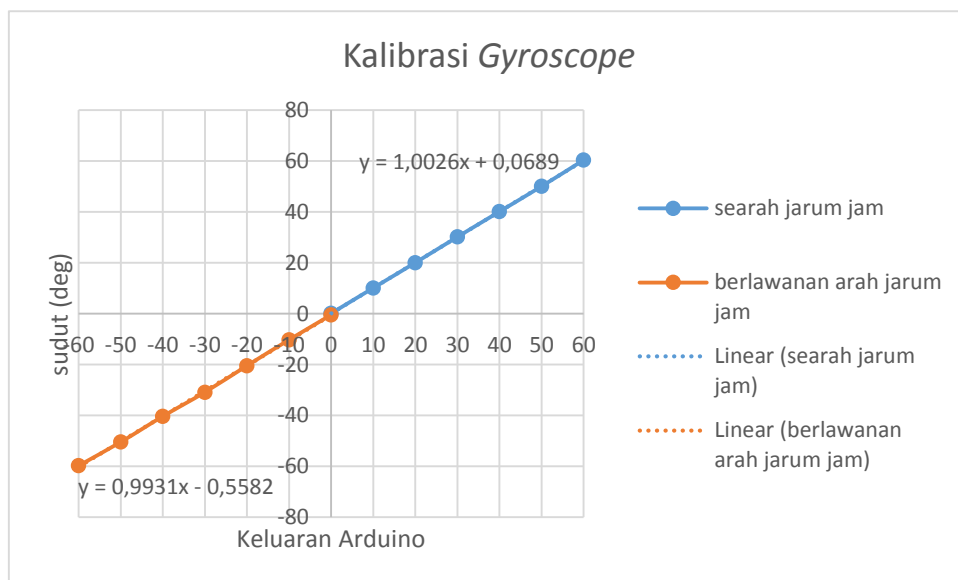
Gambar 4.15 merupakan tampilan keluaran arduino UNO di komputer. Tabel 4.23 menunjukkan sudut yang dibuat dengan hasil keluaran *gyroscope* saat *gyroscope* diputar searah jarum jam. Tabel 4.24 menunjukkan sudut yang dibuat dengan hasil keluaran *gyroscope* diputar berlawanan arah jarum jam.

Tabel 4.23 Kalibrasi Searah Jarum Jam.

Sudut (deg)	Keluaran Gyroscope (satuan)
0°	0.13
10°	10.11
20°	20.05
30°	30.17
40°	40.13
50°	50.06
60°	60.38

Tabel 4.24 Kalibrasi Berlawanan Jarum Jam.

Sudut (deg)	Keluaran Gyroscope (satuan)
0°	-0.45
10°	-10.26
20°	-20.42
30°	-30.85
40°	-40.33
50°	-50.42
60°	-59.73



Gambar 4.16 Grafik Kalibrasi Gyroscope.

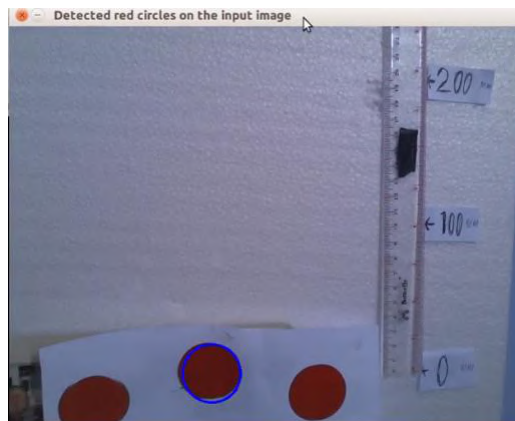
4.5.2 Kalibrasi *Image Processing*

Digital image processing adalah proses pengolahan gambar dua dimensi oleh perangkat komputer. *Digital image processing* merupakan proses pengambilan atribut-atribut pada gambar. Dalam melakukan eksperimen, alat

ini digunakan untuk merekam gerakan translasi dari model yaitu berupa gerak naik turun (*heave*) dan kanan kiri (*surge*).

Pada penelitian ini, dipasang tiga buah bola berwarna merah pada model fisik yang terapung di air yang digunakan untuk merekam gerak pada objek. Warna merah dipilih untuk mendapatkan kontras warna pada gambar yang direkam. Selain itu bentuk lingkaran juga lebih mudah dibedakan oleh program. Objek yang ditinjau adalah bola berwarna merah yang berada di titik pusat model sedangkan bola yang diletakkan di ujung model digunakan untuk perhitungan skala *pixel* dan validasi data yang dihasilkan. Proses *image processing* ini dilakukan dengan menggunakan satu buah kamera webcam logitech c270 yang merekam gambar kemudian diolah menggunakan bantuan perangkat lunak visual basic C++.

Proses kalibrasi *image processing* dilakukan dengan cara merekam kertas yang diberi gambar lingkaran berwarna merah seperti gambar 4.17. Pada proses kalibrasi kertas tersebut di gerakkan keatas dan kekanan sesuai dengan ukuran penggaris yang telah di siapkan dalam proses kalibrasi. Kemudian dilihat pada keluaran computer yang telah menangkap perpindahan dari objek lingkaran berwarna merah yang ditinjau.



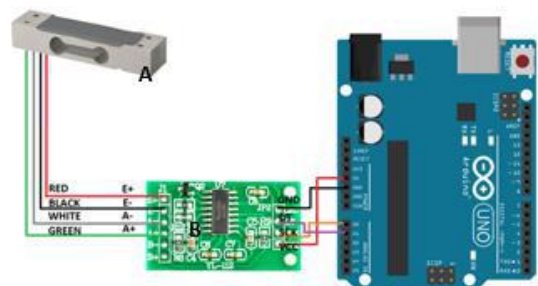
Gambar 4.17 Proses Kalibrasi *Image Processing*.

0	mm		y = 0	mm	
3	mm		y = 2	mm	
0	mm		y = 0	mm	
3	mm		y = 2	mm	
1	mm		y = 2	mm	
0	mm		y = 0	mm	
0	mm		y = 0	mm	
2	mm		y = 1	mm	
2	mm		y = 1	mm	
0	mm		y = 0	mm	
1	mm		y = 0	mm	
1	mm		y = 1	mm	
0	mm		y = 0	mm	
4	mm		y = 1	mm	
1	mm		y = 1	mm	
0	mm		y = 0	mm	
1	mm		y = 1	mm	
1	mm		y = 1	mm	
3	mm		y = 2	mm	
0	mm		y = 0	mm	
2	mm		y = 2	mm	
0	mm		y = 0	mm	
1	mm		y = 1	mm	
1	mm		y = 1	mm	
3	mm		y = 3	mm	
1	mm		y = 1	mm	
0	mm		y = 0	mm	
0	mm		y = 0	mm	

Gambar 4.18 Keluaran dari Proses Kalibrasi *Image Processing*.

4.5.3 Kalibrasi *Load Cell*

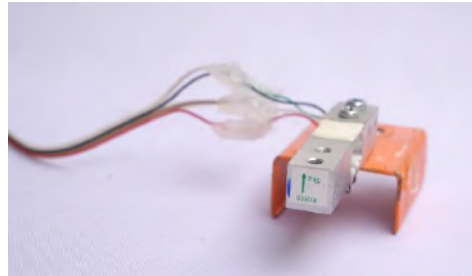
Pada eksperimen ini dilakukan pengukuran tegangan tali tambat pada model SPAR. Instrumen *load cell* digunakan untuk pengambilan data tegangan yang terjadi pada saat eksperimen model SPAR. Instrumen ini memanfaatkan *strain-gauge* yang terpasang pada *load cell*. Perubahan bentuk ini akan menghasilkan perubahan tegangan. Tegangan ini kemudian diamplifikasi menggunakan modul elektronik HX711 agar dapat terbaca. Tegangan yang sudah diamplifikasi akan diterima oleh *microcontroller* Arduino UNO untuk kemudian ditransfer ke laptop dalam bentuk angka-angka digital.



Gambar 4.19 Konfigurasi *Load Cell* (A), HX711 (B) dan Arduino UNO (C)

(Layad Circuit, 2010)

Instrumen *load cell* yang digunakan pada studi eksperimen ini adalah *load cell* dengan kapasitas beban maksimum 5kg dan 1 kg. *Load cell* akan berfungsi jika beban mempunyai arah sesuai arah kerja *load cell* (Gambar 4.20).



Gambar 4.20 Instrumen *Load cell* dan Arah Beban.

Kalibrasi dilakukan dengan menimbang beberapa beban terukur sehingga dapat dicari regresi linear dari nilai-nilai yang keluar. Pada kalibrasi ini digunakan 5 buah beban, 1000 gram, 500 gram, 200 gram, 100 gram dan 50 gram (Gambar 4.21). Beban yang digunakan untuk pengukuran merupakan besi timbangan yang ada dipasaran. Besi timbangan juga sudah diukur ulang di Laboratorium Mekanika Tanah menggunakan timbangan elektronik dan menunjukkan nilai ± 1 gram.

Besi timbangan ditali dan digantungkan di sisi pengukuran *load cell*. Pada layar akan terlihat keluaran angka. Kemudian, setelah diberikan beban, angka yang muncul tersebut diolah untuk dicari regresi linear kalibrasi *load cell*. Setiap *load cell* akan diuji 2 kali untuk menemukan persamaan regresi linear dari setiap *load cell*.



Gambar 4.21 Beban Kalibrasi 1000 g (A), 500 g (B), 200 g (C), 100 g (D) dan 50 g (E)

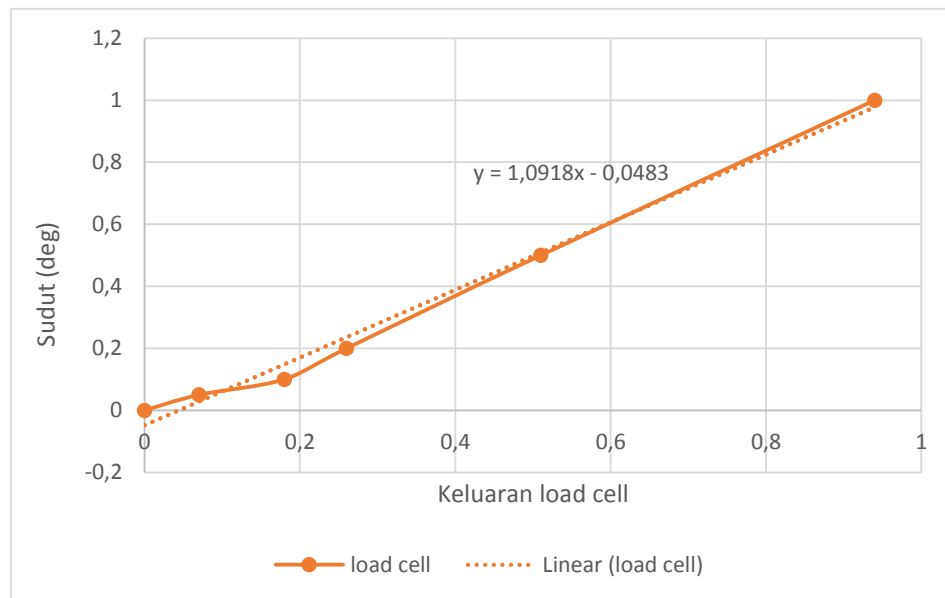
Data yang ditunjukkan dari proses kalibrasi dengan 5 timbangan pada setiap *load cell* dengan 2 percobaan yang berbeda. Setiap *load cell* mempunyai persamaan linier, sehingga bisa digunakan dengan koreksi berdasar persamaan regresi linearnya.

- *Load cell 1.*

Data pada Tabel 4.25 kemudian di-plot menjadi Gambar 4.22. Gambar 4.22 menunjukkan *Load cell 1* mempunyai persamaan linier. sehingga bisa digunakan dengan koreksi berdasar persamaan regresi linearnya.

Tabel 4.25 Data Kalibrasi Load Cell 1 Percobaan 1.

Beban (kg)	Output Percobaan
1	0.94
0,5	0.51
0,2	0.26
0,1	0.18
0,05	0.07
0	0



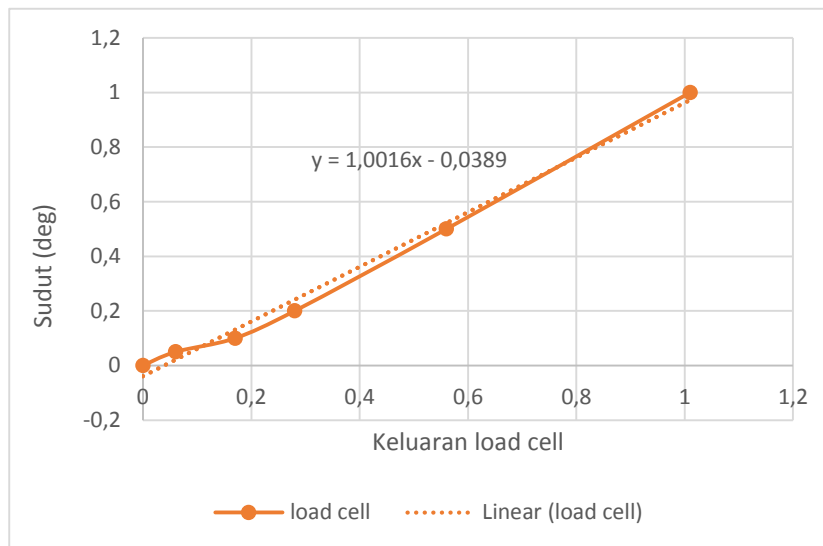
Gambar 4.22 Grafik kalibrasi Load cell 1.

- *Load cell 2*

Data pada Tabel 4.26 kemudian di-plot menjadi Gambar 4.23. Gambar 4.23 menunjukkan *Load cell 2* mempunyai persamaan linier sehingga bisa digunakan dengan koreksi berdasar persamaan regresi linearnya.

Tabel 4.26 Data Kalibrasi Load Cell 2.

Beban (kg)	Output Percobaan
1	1.01
0.5	0.56
0.25	0.28
0.1	0.17
0.05	0.06
0	0



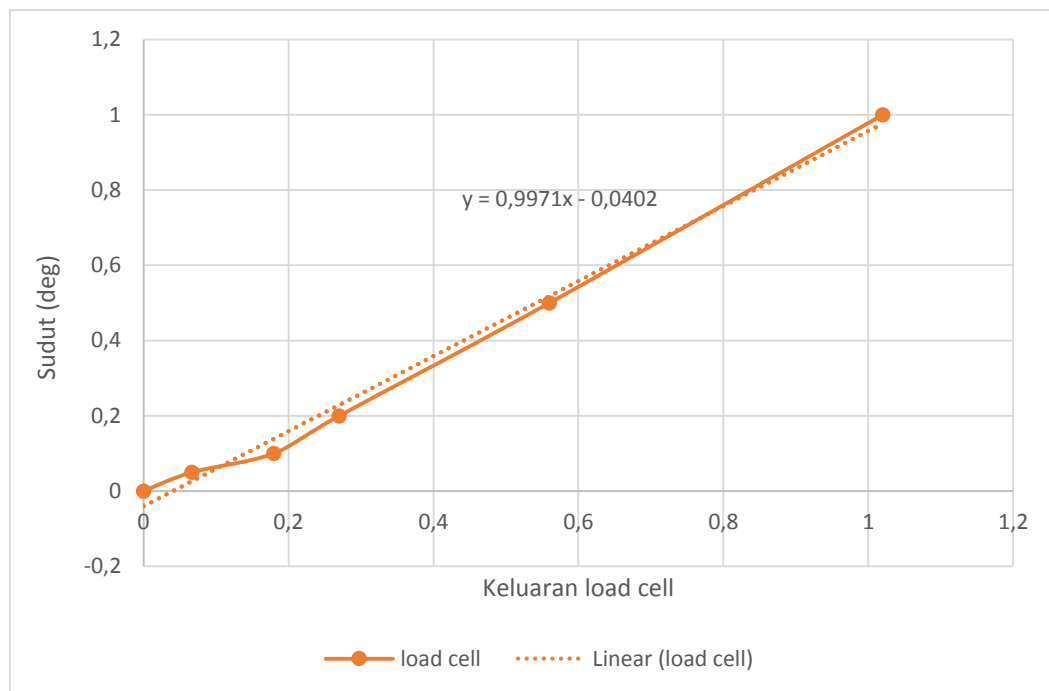
Gambar 4.23 Grafik kalibrasi *Load cell 2*.

- *Load cell 3*

Data pada Tabel 4.27 kemudian di-plot menjadi Gambar 4.24. Gambar 4.24 menunjukkan *Load cell 3* mempunyai persamaan linier sehingga bisa digunakan dengan koreksi berdasar persamaan regresi linearnya.

Tabel 4.27 Data Kalibrasi Load Cell 3.

Beban (kg)	Output Percobaan
1	1.02
0.5	0.56
0.25	0.27
0.1	0.18
0.05	0.067
0	0



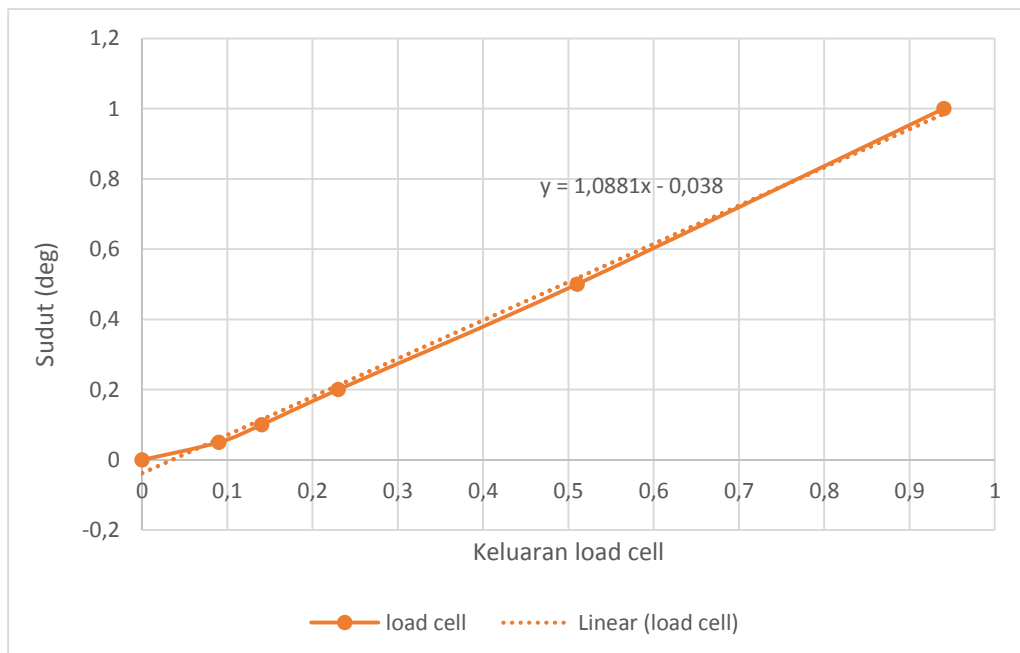
Gambar 4.124 Grafik kalibrasi *Load cell* 3.

- *Load cell* 4

Data pada Tabel 4.28 kemudian di-plot menjadi Gambar 4.25. Gambar 4.25 menunjukkan *Load cell* 4 mempunyai persamaan linier sehingga bisa digunakan dengan koreksi berdasar persamaan regresi linearnya.

Tabel 4.28 Data Kalibrasi Load Cell 4.

Beban (kg)	Output Percobaan
1	0.97
0.5	0.51
0.25	0.23
0.1	0.14
0.05	0.09
0	0



Gambar 4.25 Grafik kalibrasi *Load cell* 4.

Persamaan yang digunakan untuk mengkalibrasi keluaran *load cell* ditampilkan dalam Tabel 4.29.

Tabel 4.29 Persamaan Kalibrasi Keluaran Load cell dengan Beban.

LOAD CELL 1	$y = 1,09x - 0.04$
LOAD CELL 2	$y = 1.00x - 0.04$
LOAD CELL 3	$y = 0.99x - 0.04$
LOAD CELL 4	$y = 1.09x - 0, .04$

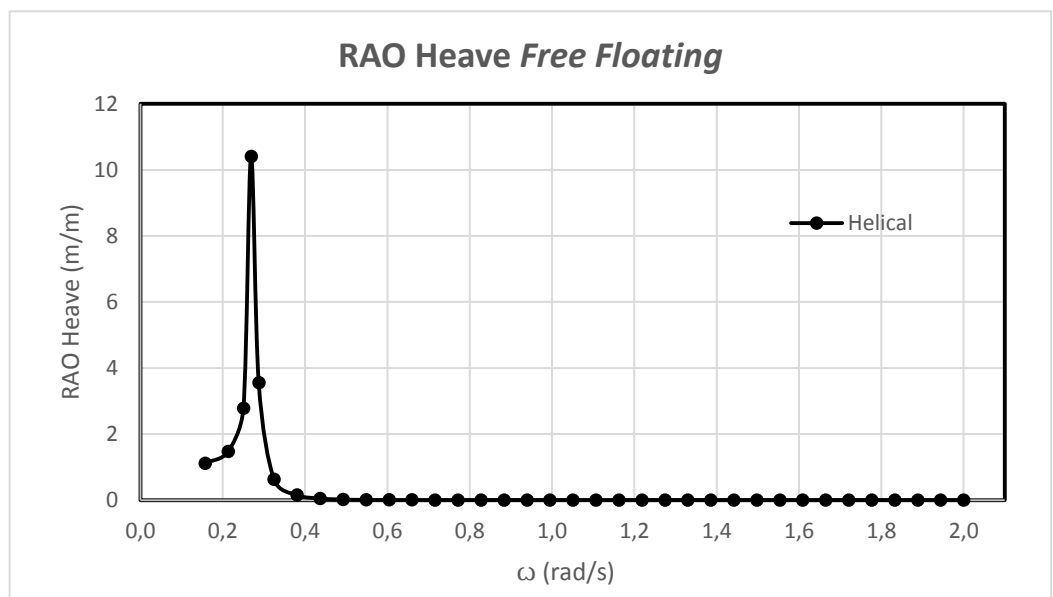
4.6 RAO TERAPUNG BEBAS

4.6.1 Metode Numeris Terapung Bebas

Perhitungan numeris dari respon gerak bangunan apung pada kondisi terapung bebas (*free floating*) dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS AQWA. Parameter yang dimasukkan dalam perangkat lunak adalah massa struktur SPAR, *Center of Gravity*, dan Radius Girasi.

A. Mode Gerak Heave

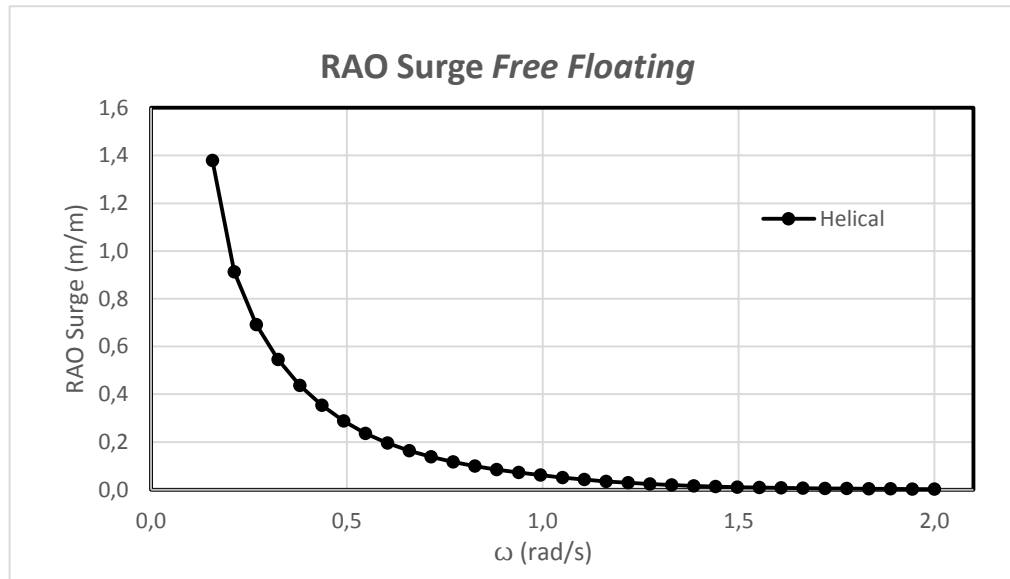
RAO pada mode gerak *heave* dari SPAR ditampilkan pada Gambar 4.26. RAO *heave* pada arah pembebanan 0° mempunyai frekuensi natural pada frekuensi 0.268 rad/s dengan nilai 10.402 m/m.



Gambar 4.26 RAO Gerakan *Heave Free Floating* Metode Numeris.

B. Mode Gerak Surge

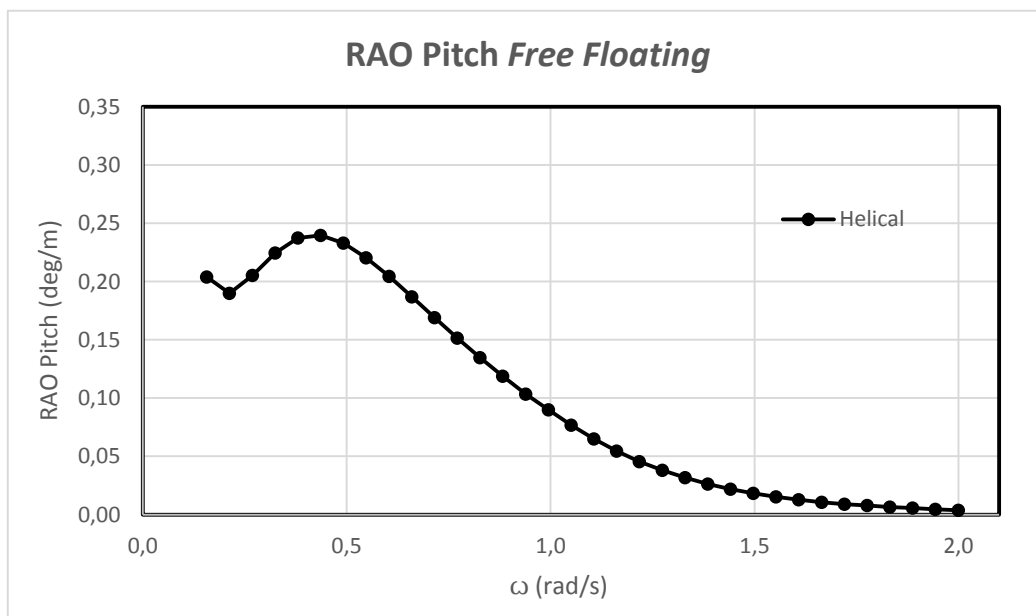
RAO pada mode gerak *surge* dari SPAR ditampilkan pada Gambar 4.27. RAO *surge* pada arah pembebanan 0° mempunyai frekuensi natural pada frekuensi 0.157 rad/s dengan nilai 1.378 m/m. Hal ini diakibatkan karena pada keadaan terapung bebas gerak *surge* tidak memiliki kekakuan.



Gambar 4.27 RAO Gerakan *Surge Free Floating* Metode Numeris.

C. Mode Gerak *Pitch*

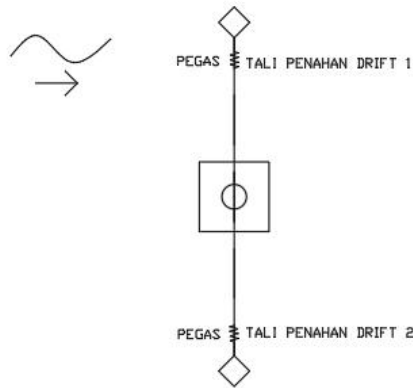
RAO pada mode gerak *pitch* dari SPAR ditampilkan pada gambar 4.28. RAO *pitch* pada arah pembebanan 0° mempunyai frekuensi natural pada frekuensi 0.436 rad/s dengan nilai 0.239 deg/m.



Gambar 4.28 RAO Gerakan *Pitch Free Floating* Metode Numeris.

4.6.2 Metode Eksperimen Terapung Bebas

Analisis eksperimen dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS dengan menggunakan kolam berdimensi panjang 100 m, lebar 3 m, dan tinggi 1.8 m. Eksperimen SPAR pada kondisi terapung bebas dilakukan dengan konfigurasi seperti pada Gambar 4.29.



Gambar 4.29 Konfigurasi Tali Penahan *Drift*.

Tali penahan *drift* digunakan untuk menjaga struktur agar tetap sesuai dengan arah datang gelombang yang ditentukan. Tali penahan diikat sedemikian rupa agar tidak mengganggu respon gerak dari struktur. Gelombang yang digunakan dihasilkan oleh *wave maker* dengan tinggi gelombang 5 cm. Model diuji dengan tujuh variasi periode yang ditunjukkan pada Tabel 4.30. Penentuan periode yang digunakan pengujian berdasarkan hasil penskalaan dari periode gelombang sesungguhnya.

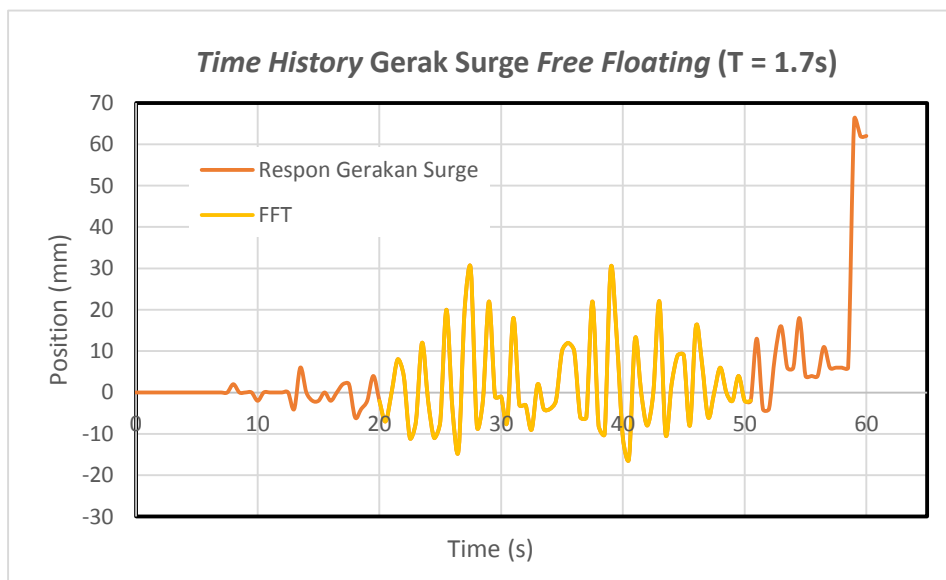


Gambar 4.30 Pengujian Kondisi *Free Floating*.

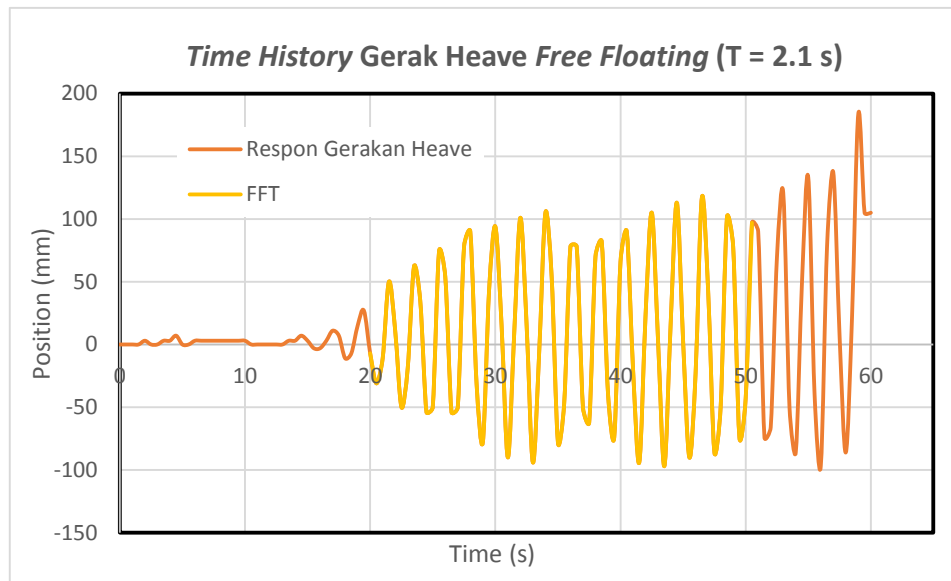
Tabel 4.30 Karakteristik Gelombang Eksperimen Free Floating.

No.	Kode	Periode Gelombang Lingkungan (s)	Periode Gelombang Eksperimen (s)	Amplitudo Gelombang (cm)
1	FF1a	40	3.60	2.5
2	FF1b	29	2.60	
3	FF1c	23.5	2.10	
4	FF1d	19	1.70	
5	FF1e	14.5	1.30	
6	FF1f	12.3	1.10	
7	FF1g	5.5	0.50	

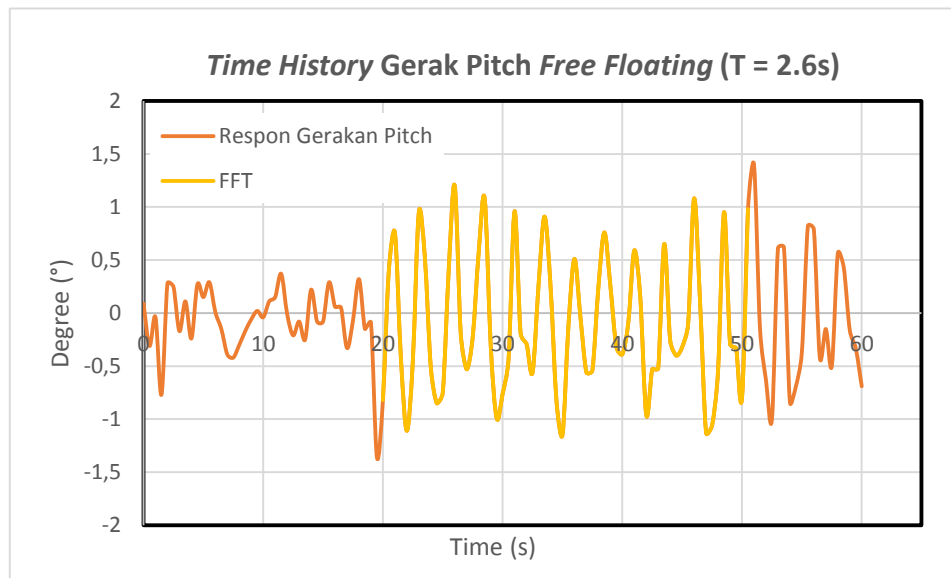
Respon gerakan struktur SPAR direkam dengan instrumen *image processing* dan *gyroscope*. *Image processing* akan mencatat respon dari mode gerak *surge* dan *heave* sedangkan *gyroscope* akan mencatat mode gerak *pitch* dari struktur. Contoh hasil eksperimen berupa respon struktur yang terekam oleh instrumen pada Gambar 4.31 untuk gerak *surge*, Gambar 4.32 untuk gerak *heave*, dan Gambar 4.33 untuk gerak *pitch*.



Gambar 4.31 Time History Gerakan Surge Pada Image Processing.



Gambar 4.32 *Time History Gerak Heave Pada Image Processing.*



Gambar 4.33 *Time History Gerak Pitch Pada Gyroscope.*

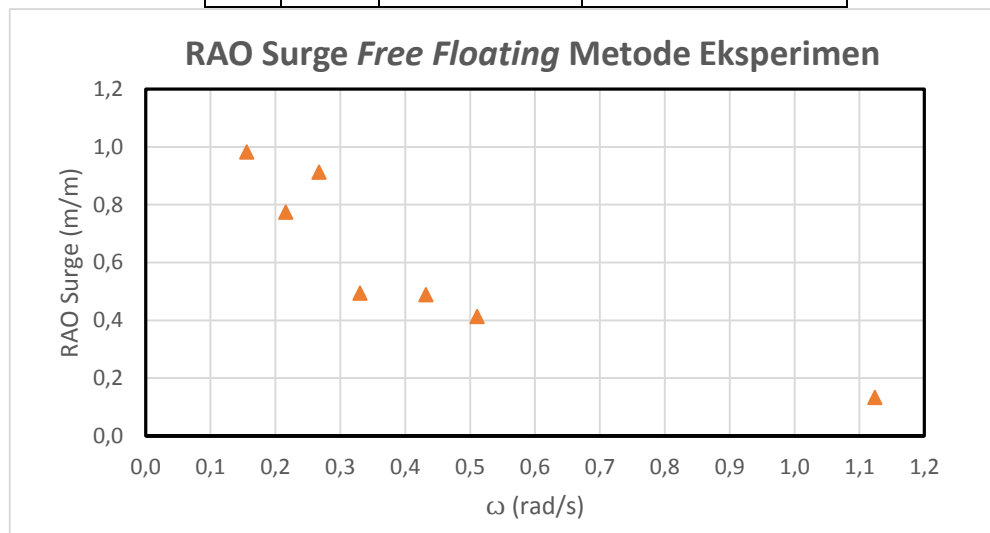
A. Mode Gerak Surge

Setiap *time history* yang dihasilkan instrumen *image processing* sumbu x pada setiap eksperimen di analisa dengan metode FFT (*Fast Fourier Transform*) untuk mengetahui besarnya respon struktur mode gerak *surge* akibat beban gelombang. Analisa dengan metode FFT dilakukan pada setiap periode yang dilakukan pada eksperimen. Tabel 4.31 menunjukkan hasil

analisa FFT yang merupakan nilai respon struktur mode gerak *surge* setiap periode pada eksperimen serta Gambar 4.34 merupakan grafik RAO dari gerakan *surge* hasil eksperimen.

Tabel 4.31 Hasil Analisa FFT Mode Gerak Surge Free Floating Metode Eksperimen.

No.	Kode	RAO Gerakan Surge (m/m)	Periode Gelombang Eksperimen (s)
1	FF1a	0.9823	3.60
2	FF2a	0.7734	2.60
3	FF3a	0.9120	2.10
4	FF4a	0.4934	1.70
5	FF5a	0.4884	1.30
6	FF6a	0.4133	1.10
7	FF7a	0.1328	0.50



Gambar 4.34 Grafik RAO Surge Free Floating Eksperimen.

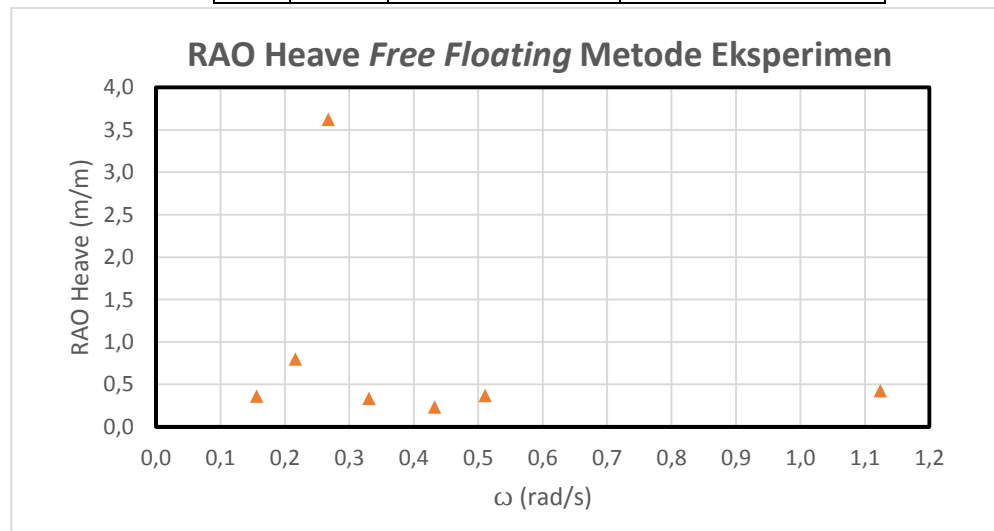
B. Mode Gerak Heave

Setiap *time history* yang dihasilkan instrumen *image processing* sumbu y pada setiap eksperimen di analisa dengan metode FFT (*Fast Fourier Transform*) untuk mengetahui besarnya respon struktur mode gerak *heave* akibat beban gelombang. Analisa dengan metode FFT dilakukan pada setiap

periode yang dilakukan pada eksperimen. Tabel 4.32 menunjukkan hasil analisa FFT yang merupakan nilai respon struktur mode gerak *heave* setiap periode pada eksperimen serta Gambar 4.35 merupakan grafik RAO dari gerakan *heave* hasil eksperimen.

Tabel 4.32 Hasil Analisa FFT Mode Gerak Heave Free Floating Metode Eksperimen.

No.	Kode	RAO Gerakan <i>Heave</i> (m/m)	Periode Gelombang Eksperimen (s)
1	FF1a	0.3613	3.60
2	FF2a	0.8000	2.60
3	FF3a	3.6231	2.10
4	FF4a	0.3336	1.70
5	FF5a	0.2320	1.30
6	FF6a	0.3688	1.10
7	FF7a	0.4240	0.50



Gambar 4.35 Grafik RAO *Heave Free Floating* Eksperimen.

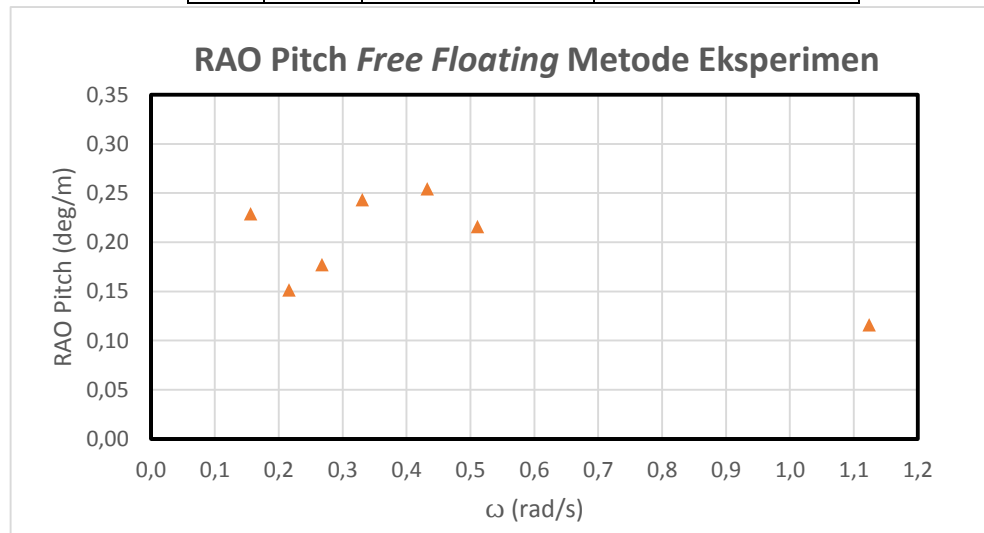
C. Mode Gerak *Heave*

Setiap *time history* yang dihasilkan instrumen *gyroscope* pada setiap eksperimen di analisa dengan metode FFT (*Fast Fourier Transform*) untuk mengetahui besarnya respon struktur mode gerak *pitch* akibat beban gelombang. Analisa dengan metode FFT dilakukan pada setiap periode yang

dilakukan pada eksperimen. Tabel 4.33 menunjukkan hasil analisa FFT yang merupakan nilai respon struktur mode gerak *pitch* setiap periode pada eksperimen serta Gambar 4.36 merupakan grafik RAO dari gerakan *pitch* hasil eksperimen.

Tabel 4.33 Hasil Analisa FFT Mode Gerak Pitch Free Floating Metode Eksperimen.

No.	Kode	RAO Gerakan Pitch (deg/m)	Periode Gelombang Eksperimen (s)
1	FF1a	0.2291	3.60
2	FF2a	0.1514	2.60
3	FF3a	0.1774	2.10
4	FF4a	0.2433	1.70
5	FF5a	0.2543	1.30
6	FF6a	0.2159	1.10
7	FF7a	0.1159	0.50



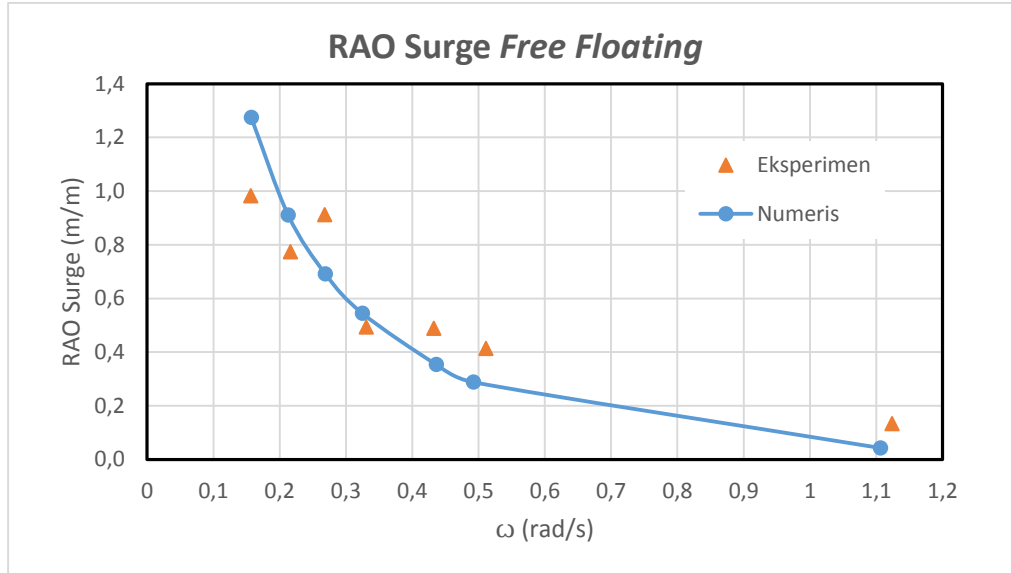
Gambar 4.36 Grafik RAO *Pitch Free Floating* Eksperimen.

4.6.3 Perbandingan RAO Terapung Bebas Metode Numerik dan Eksperimen

Pada Gambar 4.37 merupakan perbandingan RAO dari metode numeris dan eksperimen mode gerak *surge* pada kondisi terapung bebas. Gambar 4.38 menunjukkan perbandingan RAO dari metode numeris dan eksperimen mode

gerak *heave* pada kondisi terapung bebas. Gambar 4.39 menunjukkan perbandingan RAO dari metode numeris dan eksperimen mode gerak *pitch* pada kondisi terapung bebas.

A. Mode Gerak *Surge*



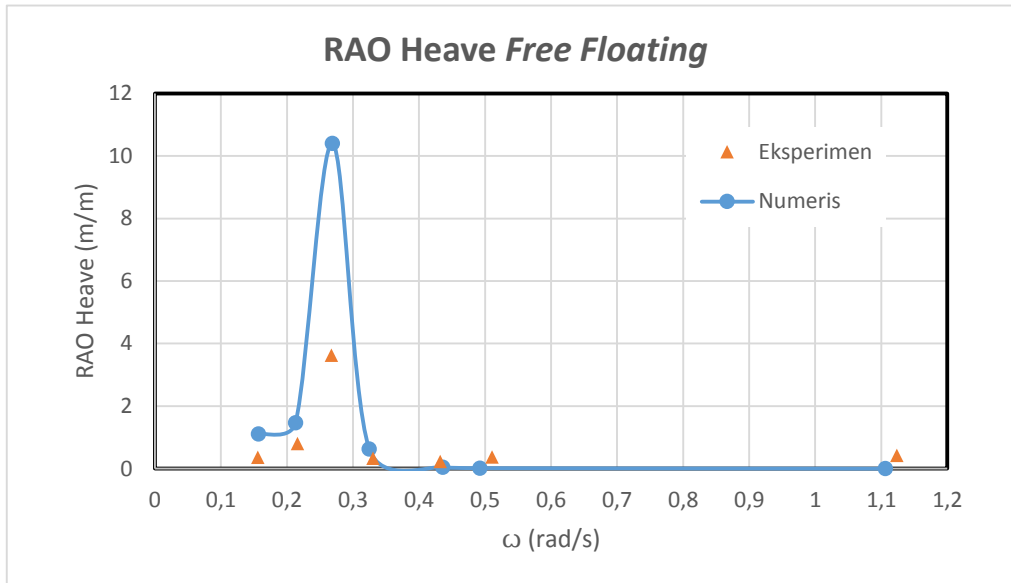
Gambar 4.37 Grafik Perbandingan RAO *Surge Free Floating* Metode Numeris dan Eksperimen.

Menurut Gambar 4.37 analisa metode numeris dan eksperimen menunjukkan posisi frekuensi natural yang sama pada mode gerak *surge* yaitu pada 0.1571 rad/s. Nilai respon tertinggi metode numeris dan eksperimen mode gerak *surge* pada kondisi terapung bebas dapat dilihat pada Tabel 4.34.

Tabel 4.34 Nilai Perbandingan RAO *Surge Free Floating* Metode Numeris dan Eksperimen.

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Numerik	0.1571	1.2742
Eksperimen	0.1571	0.9823

B. Mode Gerak *Heave*



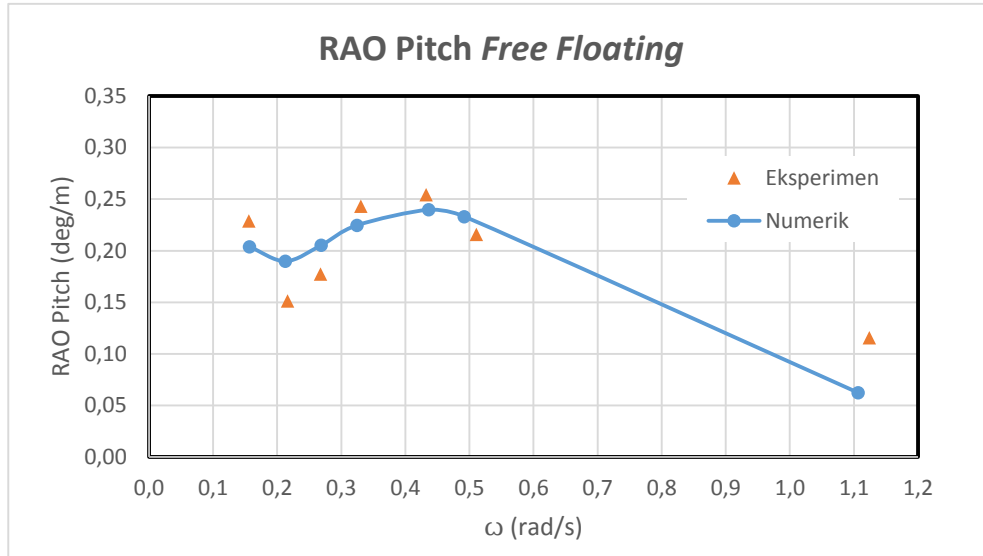
Gambar 4.38 Grafik Perbandingan RAO *Heave Free Floating* Metode Numeris dan Eksperimen.

Menurut Gambar 4.38 analisa metode numeris dan eksperimen menunjukkan posisi frekuensi natural yang sama pada mode gerak *heave* yaitu pada 0.2688 rad/s. Nilai respon tertinggi metode numeris dan eksperimen mode gerak *heave* pada kondisi terapung bebas dapat dilihat pada Tabel 4.35.

Tabel 4.35 Nilai Perbandingan RAO *Heave Free Floating* Metode Numeris dan Eksperimen.

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Numeris	0.2688	10.4024
Eksperimen	0.2688	3.6231

C. Mode Gerak *Pitch*



Gambar 4.39 Grafik Perbandingan RAO *Pitch Free Floating* Metode Numeris dan Eksperimen.

Menurut Gambar 4.39 analisa metode numeris dan eksperimen menunjukkan posisi frekuensi natural yang sama pada mode gerak *pitch* yaitu pada 0.4363 rad/s. Nilai respon tertinggi metode numeris dan eksperimen mode gerak *pitch* pada kondisi terapung bebas dapat dilihat pada Tabel 4.36.

Tabel 4.36 Nilai Perbandingan RAO *Pitch Free Floating* Metode Numeris dan Eksperimen.

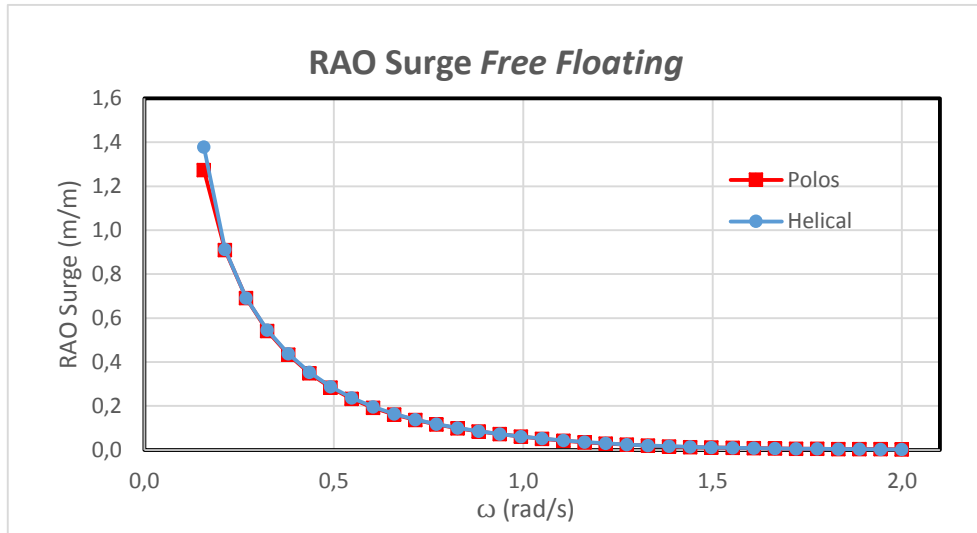
Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (deg/m)
Numeris	0.4363	0.2398
Eksperimen	0.4363	0.2543

4.6.4 Perbandingan RAO SPAR Tanpa *Helical Strakes* Dengan SPAR *Helical Strakes* Terapung Bebas

Pada Gambar 4.40 merupakan perbandingan RAO dari SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes* mode gerak *surge* pada kondisi terapung bebas. Gambar 4.41 menunjukkan perbandingan RAO dari SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes* mode gerak *heave* pada kondisi terapung

bebas. Gambar 4.42 menunjukkan menunjukkan perbandingan RAO dari SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes* mode gerak *pitch* pada kondisi terapung bebas.

A. Mode Gerak Surge



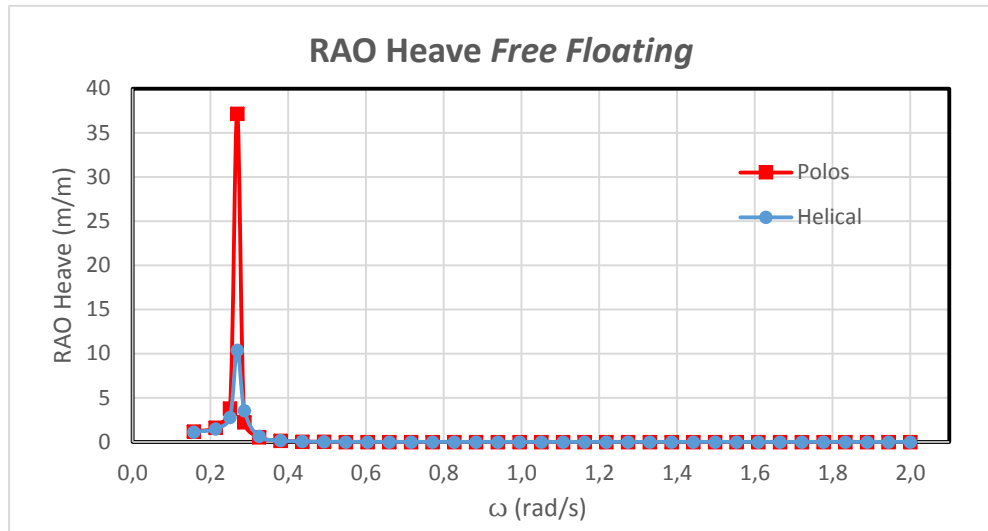
Gambar 4.40 Grafik Perbandingan RAO Surge Free Floating Helical Strakes dan Tanpa Helical Strakes.

Menurut Gambar 4.40 antara SPAR *helical strakes* dengan SPAR tanpa *helical strakes* menunjukkan posisi frekuensi natural yang sama pada mode gerak *surge* yaitu pada 0.1571 rad/s. Akan tetapi nilai RAO *helical strakes* lebih besar daripada tanpa *helical strakes* pada kondisi terapung bebas dapat dilihat pada Tabel 4.37.

Tabel 4.37 Nilai Perbandingan RAO Surge Free Floating SPAR Helical Strakes dengan Tanpa Helical Strakes.

SPAR	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
<i>Helical Strakes</i>	0.1571	1.378
Tanpa <i>Helical Strakes</i>	0.1571	1.274

B. Mode Gerak *Heave*



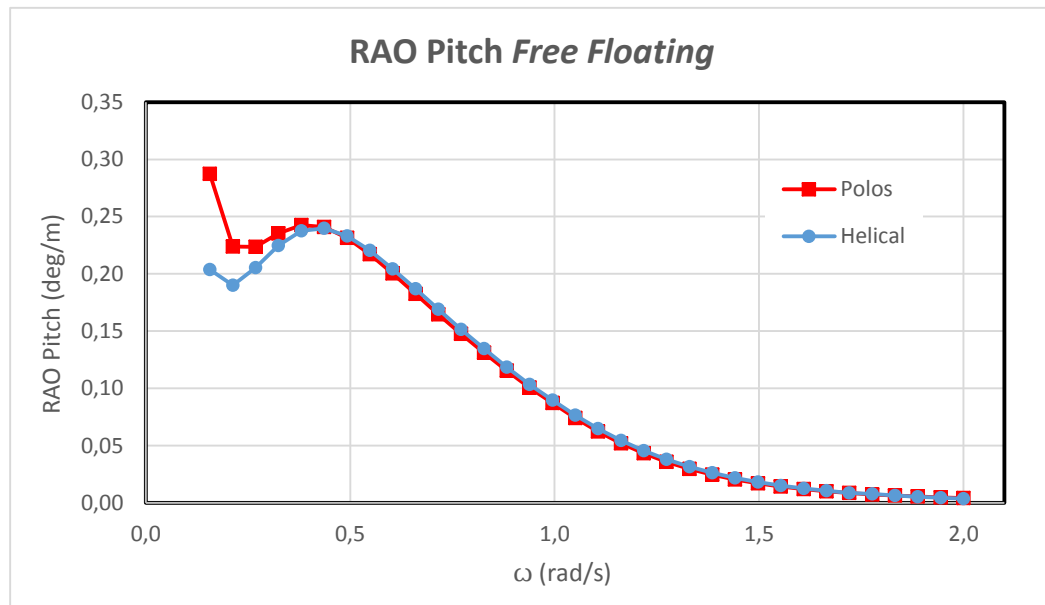
Gambar 4.41 Grafik Perbandingan RAO *Heave Free Floating Helical Strakes* dan Tanpa *Helical Strakes*.

Menurut Gambar 4.41 antara SPAR *helical strakes* dengan SPAR tanpa *helical strakes* menunjukkan posisi frekuensi natural yang sama pada mode gerak *heave* yaitu pada 0.2688 rad/s. Akan tetapi nilai RAO *helical strakes* lebih kecil daripada tanpa *helical strakes* pada kondisi terapung bebas dapat dilihat pada Tabel 4.38.

Tabel 4.38 Nilai Perbandingan RAO *Heave Free Floating SPAR Helical Strakes* dengan Tanpa *Helical Strakes*.

SPAR	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
<i>Helical Strakes</i>	0.2688	10.4024
Tanpa <i>Helical Strakes</i>	0.2688	35.5342

C. Mode Gerak *Pitch*



Gambar 4.42 Grafik Perbandingan RAO *Pitch Free Floating Helical Strakes* dan Tanpa *Helical Strakes*.

Menurut Gambar 4.42 antara SPAR *helical strakes* dengan SPAR tanpa *helical strakes* menunjukkan posisi frekuensi natural yang berbeda, dimana SPAR *helical strakes* pada 0.4363 rad/s dan tanpa *helical strakes* pada 0.1571 rad/s. Akan tetapi nilai RAO *helical strakes* lebih kecil daripada tanpa *helical strakes* pada kondisi terapung bebas dapat dilihat pada Tabel 4.39.

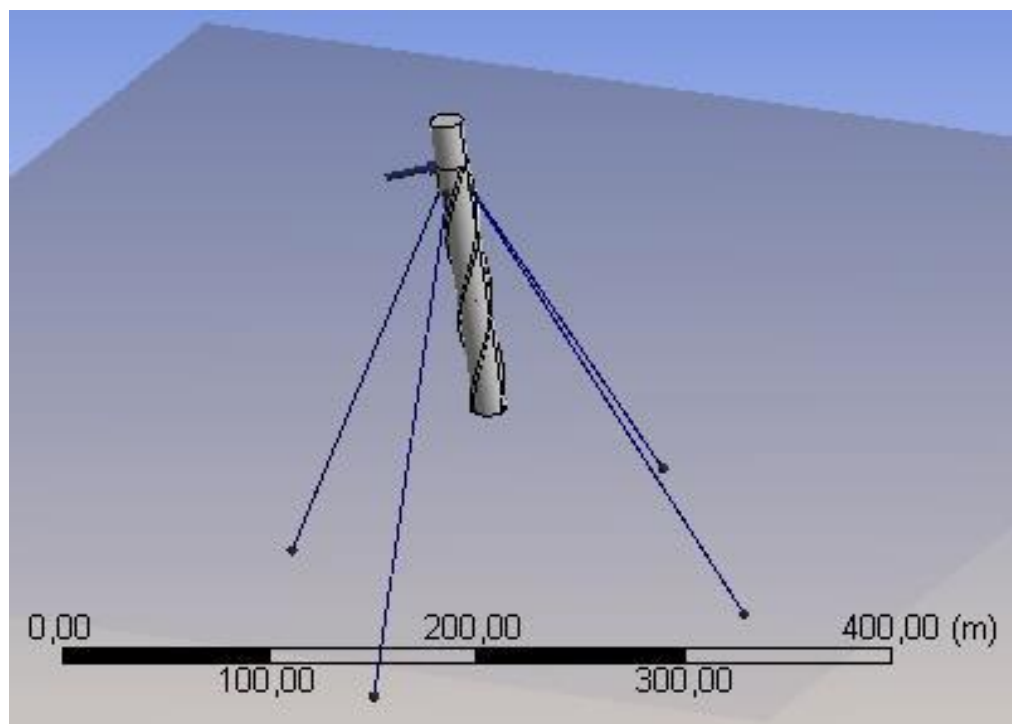
Tabel 4.39 Nilai Perbandingan RAO *Pitch Free Floating SPAR Helical Strakes* dengan Tanpa *Helical Strakes*.

SPAR	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
<i>Helical Strakes</i>	0.4363	0.2398
Tanpa <i>Helical Strakes</i>	0.1571	0.2873

4.7 RAO TERTAMBAT

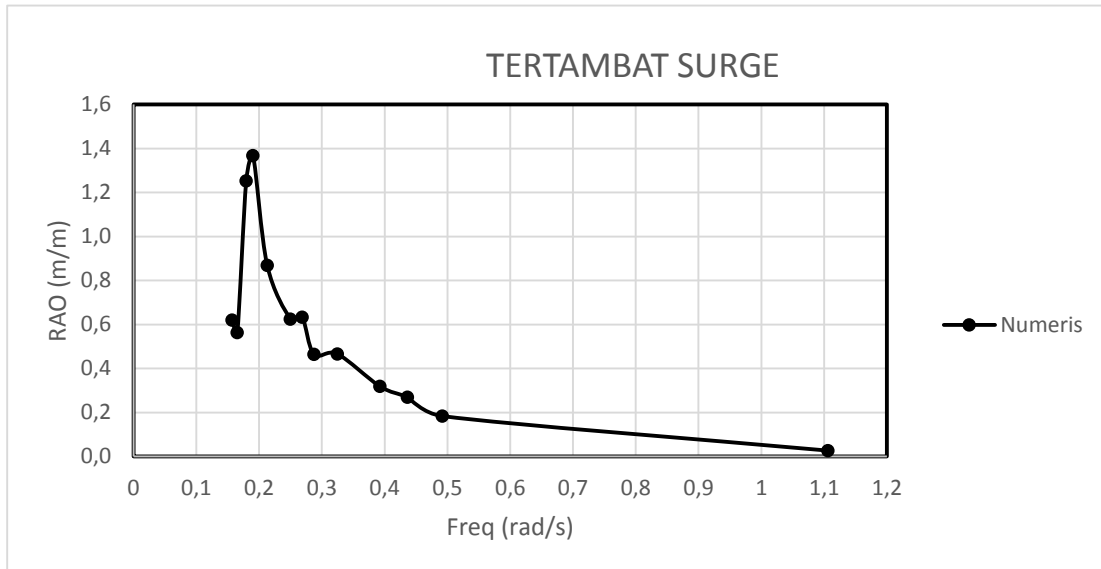
4.7.1 Metode Numeris Tertambat

Perhitungan numeris dari respon gerak bangunan apung pada kondisi tertambat dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Ansys Aqwa* hampir sama dengan kondisi terapung bebas tetapi dengan penambahan tali tambat dan parameternya. Parameter yang dimasukkan dalam perangkat lunak adalah massa struktur SPAR, *Center of Gravity*, dan Radius Girasi.



Gambar 4.43 Kondisi Tertambat *Ansys Aqwa*.

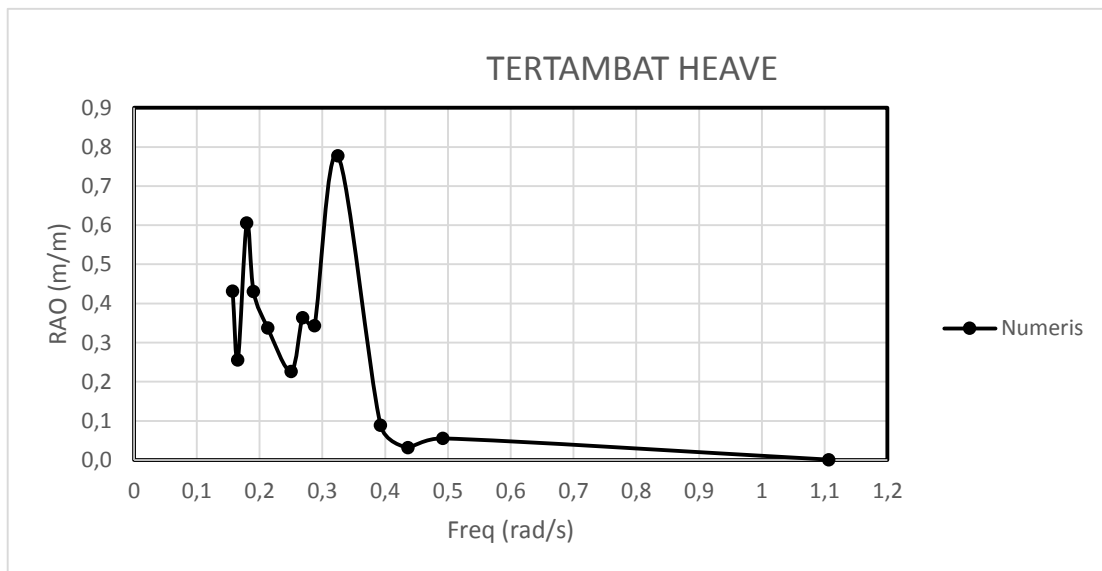
A. Mode Gerak *Surge*



Gambar 4.44 RAO Gerak Surge Metode Numeris Tertambat.

Pada Gambar 4.44 menunjukkan respon gerak struktur SPAR *helical strakes* pada mode gerak *surge* kondisi tertambat. *Response Amplitude Operator* (RAO) mode gerak *surge* metode numeris, tertinggi terjadi pada frekuensi 0.1903 rad/s sebesar 1,367 m/m.

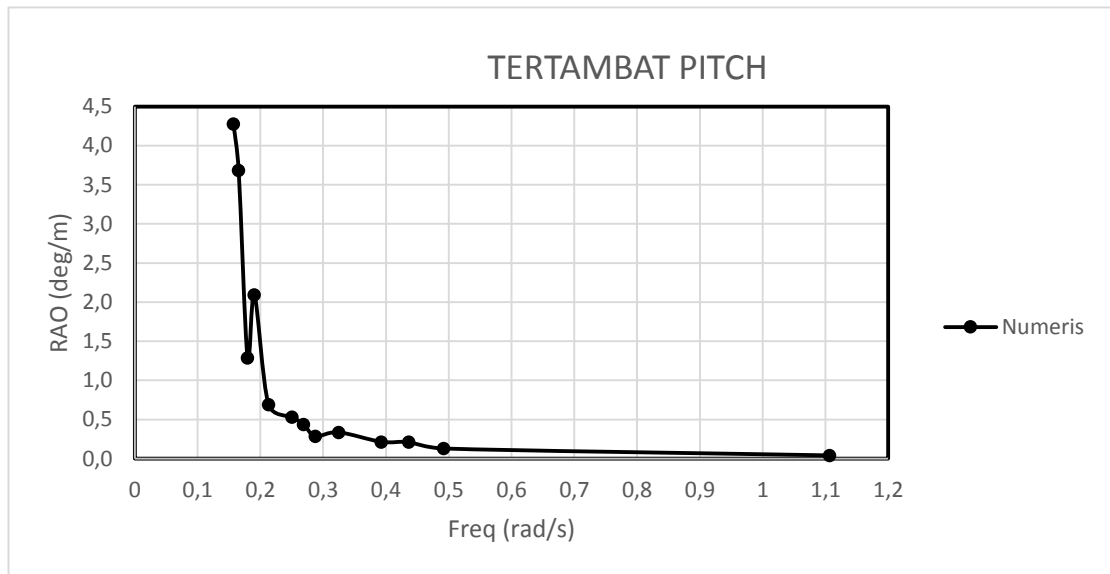
B. Mode Gerak *Heave*



Gambar 4.45 RAO Gerak *Heave* Metode Numeris Tertambat.

Pada Gambar 4.45 menunjukkan respon gerak struktur SPAR *helical strakes* pada mode gerak *heave* kondisi tertambat. *Response Amplitude Operator* (RAO) mode gerak *heave* metode numeris, tertinggi terjadi pada frekuensi 0.324 rad/s sebesar 0.778 m/m.

C. Mode Gerak *Pitch*

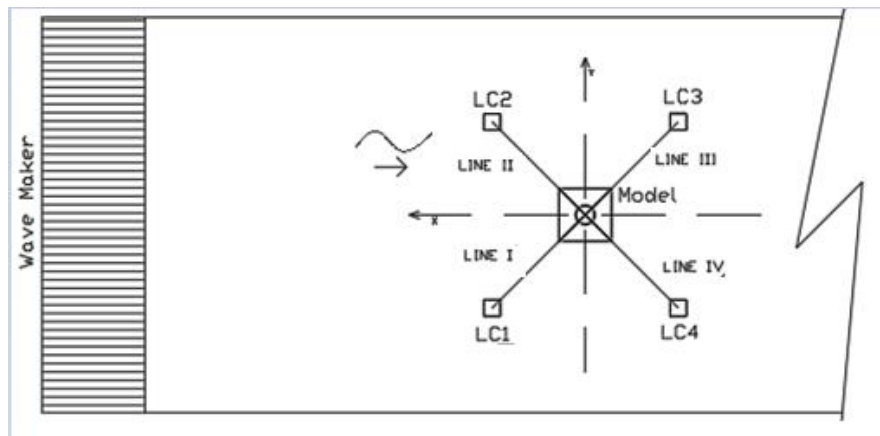


Gambar 4.46 RAO Gerak *Pitch* Metode Numeris Tertambat.

Pada Gambar 4.46 menunjukkan respon gerak struktur SPAR *helical strakes* pada mode gerak *pitch* kondisi tertambat. *Response Amplitude Operator* (RAO) mode gerak *pitch* metode numeris, tertinggi terjadi pada frekuensi 0.157 rad/s sebesar 0.4276 Deg/m.

4.7.2 Metode Eksperimen Tertambat

Analisis eksperimen dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS dengan menggunakan kolam berdimensi panjang 100 m, lebar 3 m, dan tinggi 1.8 m. Eksperimen SPAR pada kondisi tertambat dilakukan dengan konfigurasi seperti pada Gambar 4.47.



Gambar 4.47 Konfigurasi Eksperimen Tertambat.

Tali tambat yang digunakan sebanyak empat buah yang diatur dengan panjang yang sama dan tali dipasang dalam kondisi taut. Tali tambat dihubungkan pada *load cell* yang berada pada jangkar yang telah berada di dasar kolam untuk mencatat *tension* tali yang terjadi. Gelombang yang digunakan dihasilkan oleh *wave maker* dengan tinggi gelombang 5 cm. Model diuji dengan tujuh variasi periode yang ditunjukkan pada Tabel 4.30. Penentuan periode yang digunakan pengujian berdasarkan hasil penskalaan dari periode gelombang sesungguhnya. Respon gerakan struktur SPAR direkam dengan instrumen *image processing* dan *gyroscope*. *Image processing* akan mencatat respon dari mode gerak *surge* dan *heave* sedangkan *gyroscope* akan mencatat mode gerak *pitch* dari struktur.



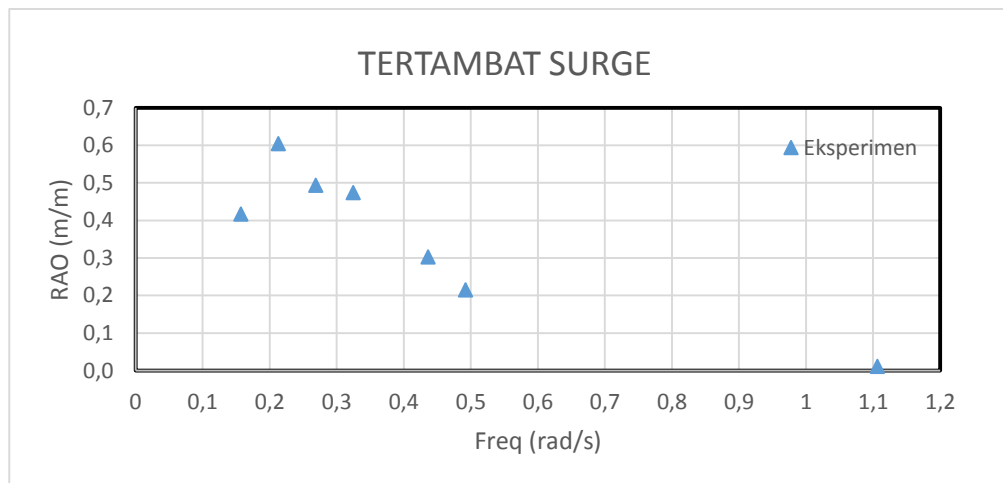
Gambar 4.48 Pengujian Kondisi Tertambat.

A. Mode Gerak *Surge*

Setiap *time history* yang dihasilkan instrumen *image processing* sumbu x pada setiap eksperimen di analisis dengan metode FFT (*Fast Fourier Transform*) untuk mengetahui besarnya respon struktur mode gerak *surge* akibat beban gelombang. Analisis dengan metode FFT dilakukan pada setiap periode yang dilakukan pada eksperimen. Tabel 4.40 menunjukkan hasil analisa FFT yang merupakan nilai respon struktur mode gerak *surge* setiap periode pada eksperimen serta Gambar 4.49 merupakan grafik RAO dari gerakan *surge* hasil eksperimen.

Tabel 4.40 Hasil Analisa FFT Mode Gerak Surge Tertambat Metode Eksperimen.

No.	Kode	RAO Gerakan Surge (m/m)	Periode Gelombang Eksperimen (s)
1	TT1a	0.417	3.60
2	TT2a	0.605	2.60
3	TT3a	0.494	2.10
4	TT4a	0.474	1.70
5	TT5a	0.303	1.30
6	TT6a	0.215	1.10
7	TT7a	0.011	0.50



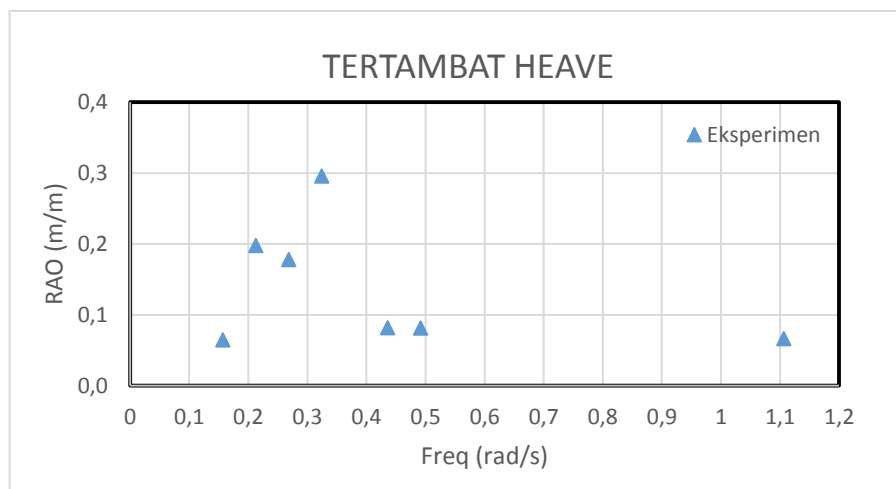
Gambar 4.49 Grafik RAO *Surge* Tertambat Eksperimen.

B. Mode Gerak *Heave*

Setiap *time history* yang dihasilkan instrumen *image processing* sumbu y pada setiap eksperimen di analisis dengan metode FFT (*Fast Fourier Transform*) untuk mengetahui besarnya respon struktur mode gerak *heave* akibat beban gelombang. Analisis dengan metode FFT dilakukan pada setiap periode yang dilakukan pada eksperimen. Tabel 4.41 menunjukkan hasil analisa FFT yang merupakan nilai respon struktur mode gerak *heave* setiap periode pada eksperimen serta Gambar 4.50 merupakan grafik RAO dari gerakan *heave* hasil eksperimen.

Tabel 4.41 Hasil Analisa FFT Mode Gerak Heave Tertambat Metode Eksperimen.

No.	Kode	RAO Gerakan Heave (m/m)	Periode Gelombang Eksperimen (s)
1	TT1a	0.0645	3.60
2	TT2a	0.1978	2.60
3	TT3a	0.1779	2.10
4	TT4a	0.2956	1.70
5	TT5a	0.0816	1.30
6	TT6a	0.0812	1.10
7	TT7a	0.0666	0.50



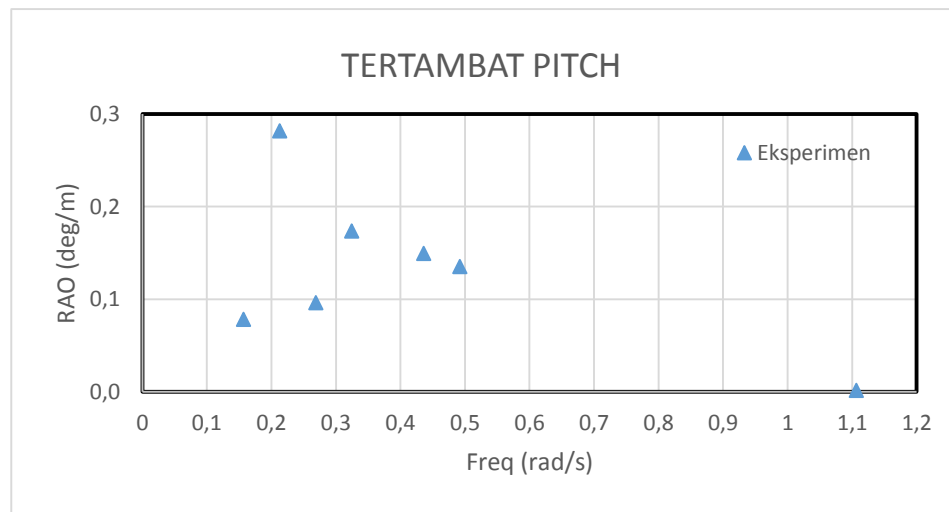
Gambar 4.50 Grafik RAO *Heave* Tertambat Eksperimen.

C. Mode Gerak *Pitch*

Setiap *time history* yang dihasilkan instrumen *gyroscope* pada setiap eksperimen di analisis dengan metode FFT (*Fast Fourier Transform*) untuk mengetahui besarnya respon struktur mode gerak *pitch* akibat beban gelombang. Analisis dengan metode FFT dilakukan pada setiap periode yang dilakukan pada eksperimen. Tabel 4.42 menunjukkan hasil analisa FFT yang merupakan nilai respon struktur mode gerak *pitch* setiap periode pada eksperimen serta Gambar 4.51 merupakan grafik RAO dari gerakan *pitch* hasil eksperimen.

Tabel 4.42 Hasil Analisa FFT Mode Gerak Pitch Tertambat Metode Eksperimen.

No.	Kode	RAO Gerakan Pitch (deg/m)	Periode Gelombang Eksperimen (s)
1	TT1a	0.0782	3.60
2	TT2a	0.2815	2.60
3	TT3a	0.0962	2.10
4	TT4a	0.1736	1.70
5	TT5a	0.1492	1.30
6	TT6a	0.1351	1.10
7	TT7a	0.0014	0.50

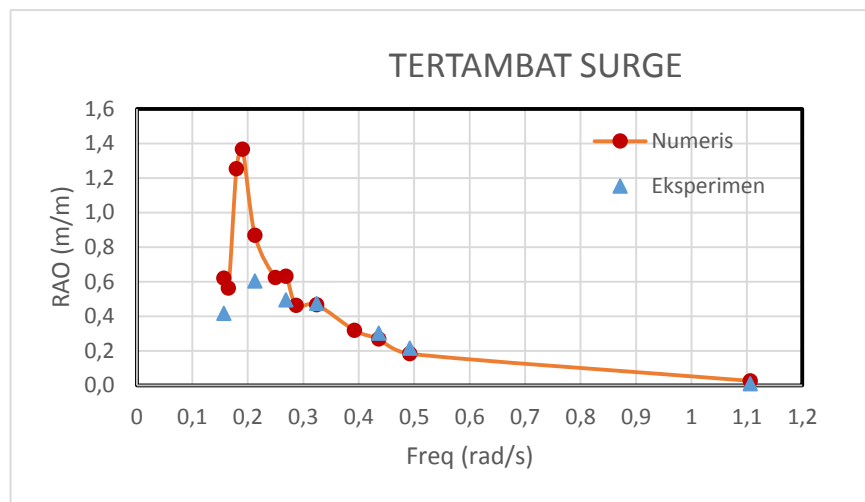


Gambar 4.51 Grafik RAO *Pitch* Tertambat Eksperimen.

4.7.3 Perbandingan RAO Tertambat Metode Numerik dan Eksperimen

Pada Gambar 4.52 merupakan perbandingan RAO dari metode numeris dan eksperimen mode gerak *surge* pada kondisi tertambat. Gambar 4.53 menunjukkan perbandingan RAO dari metode numeris dan eksperimen mode gerak *heave* pada kondisi tertambat. Gambar 4.54 menunjukkan perbandingan RAO dari metode numeris dan eksperimen mode gerak *pitch* pada kondisi tertambat.

A. Mode Gerak *Surge*



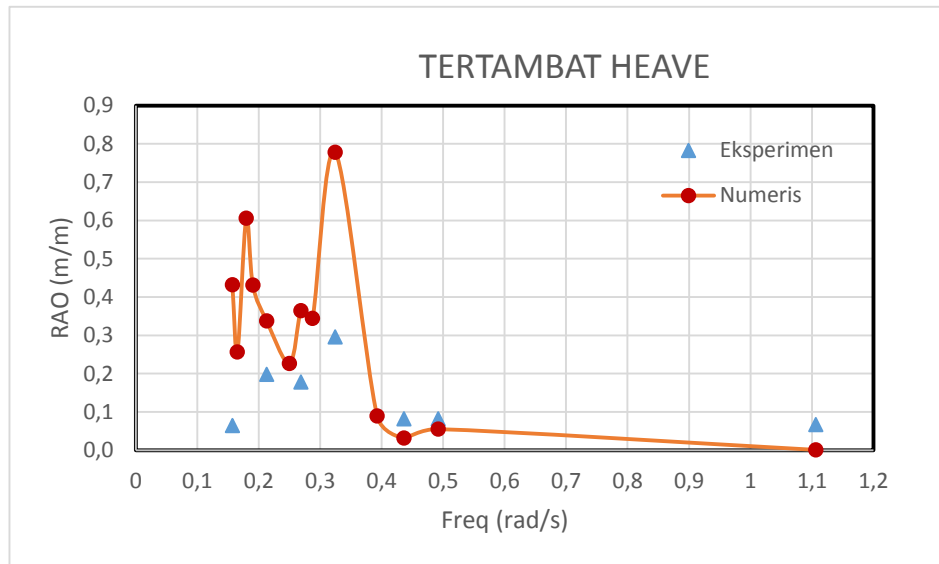
Gambar 4.52 Grafik Perbandingan RAO *Surge* Tertambat Metode Numeris dan Eksperimen.

Menurut Gambar 4.52 analisis metode numeris dan eksperimen menunjukkan posisi frekuensi natural yang berbaeda pada mode gerak *surge*, dimana frekuensi natural pada metode numeris 0.1903 rad/s sedangkan pada metode eksperimen 0.2129 rad/s. Nilai respon tertinggi metode numeris dan eksperimen mode gerak *surge* pada kondisi tertambat dapat dilihat pada Tabel 4.43.

Tabel 4.43 Nilai Perbandingan RAO *Surge* Tertambat Metode Numeris dan Eksperimen.

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Numerik	0.1903	1.367
Eksperimen	0.2129	0.605

B. Mode Gerak *Heave*



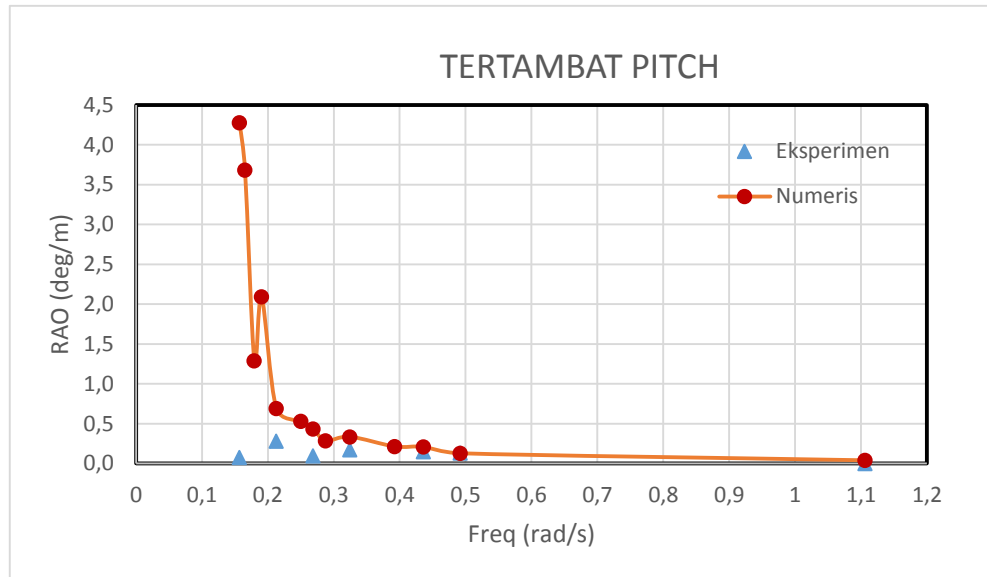
Gambar 4.53 Grafik Perbandingan RAO *Heave* Tertambat Metode Numeris dan Eksperimen.

Menurut Gambar 4.53 analisis metode numeris dan eksperimen menunjukkan posisi frekuensi natural yang sama pada mode gerak *heave* yaitu pada 0.3245 rad/s. Nilai respon tertinggi metode numeris dan eksperimen mode gerak *heave* pada kondisi tertambat dapat dilihat pada Tabel 4.44.

Tabel 4.44 Nilai Perbandingan RAO *Heave* Tertambat Metode Numeris dan Eksperimen.

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Numerik	0.3245	0.778
Eksperimen	0.3245	0.295

C. Mode Gerak *Pitch*



Gambar 4.54 Grafik Perbandingan RAO *Pitch* Tertambat Metode Numeris dan Eksperimen.

Menurut Gambar 4.54 analisis metode numeris dan eksperimen menunjukkan posisi frekuensi natural yang sama pada mode gerak *pitch*, dimana frekuensi natural pada metode numeris 0.1570 rad/s sedangkan pada metode eksperimen 0.2129 rad/s. Nilai respon tertinggi metode numeris dan eksperimen mode gerak *pitch* pada kondisi tertambat dapat dilihat pada Tabel 4.45.

Tabel 4.45 Nilai Perbandingan RAO *Heave* Tertambat Metode Numeris dan Eksperimen.

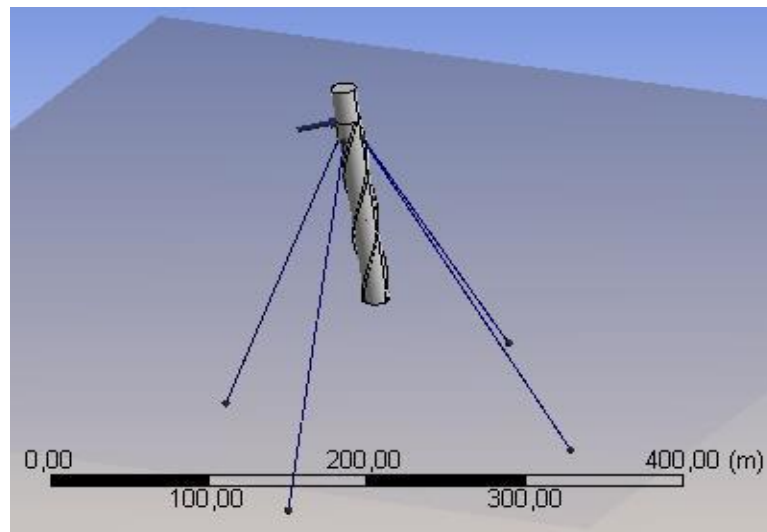
Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (Deg/m)
Numerik	0.1570	4.276
Eksperimen	0.2129	0.281

4.8 TENSION TALI

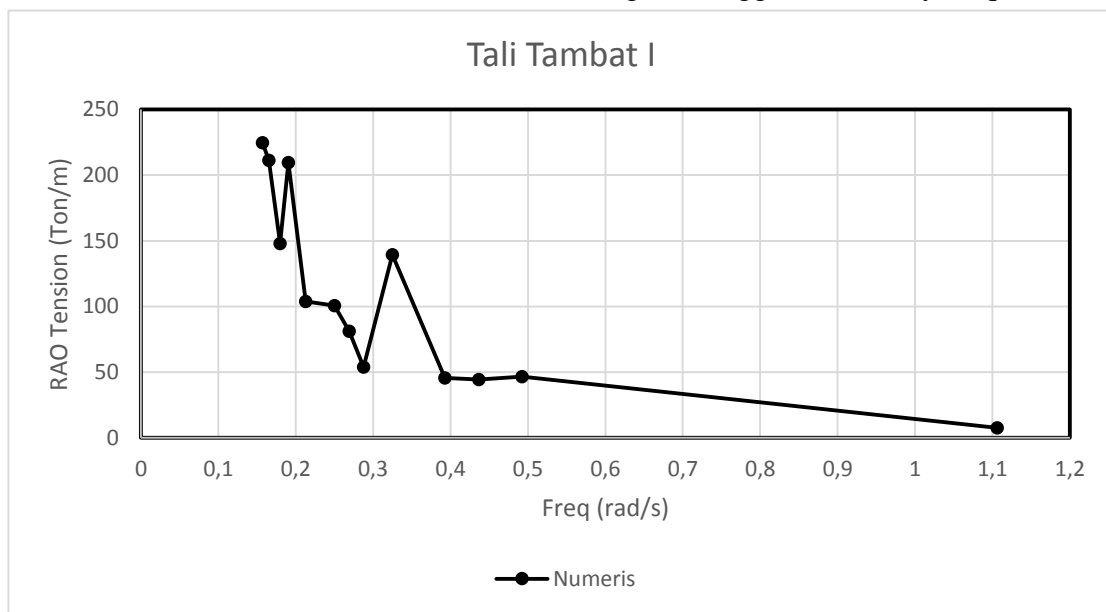
4.8.1 *Tension* Tali Metode Numeris

Tali tambat pada struktur akan mengalami gaya tarik ketika struktur berosilasi sesuai dengan gaya gelombang yang diterima. Besar *tension* yang terjadi pada struktur dianalisa dengan dua metode yaitu metode numeris dan metode eksperimen. Pada metode numeris *tension* tali dianalisis dengan

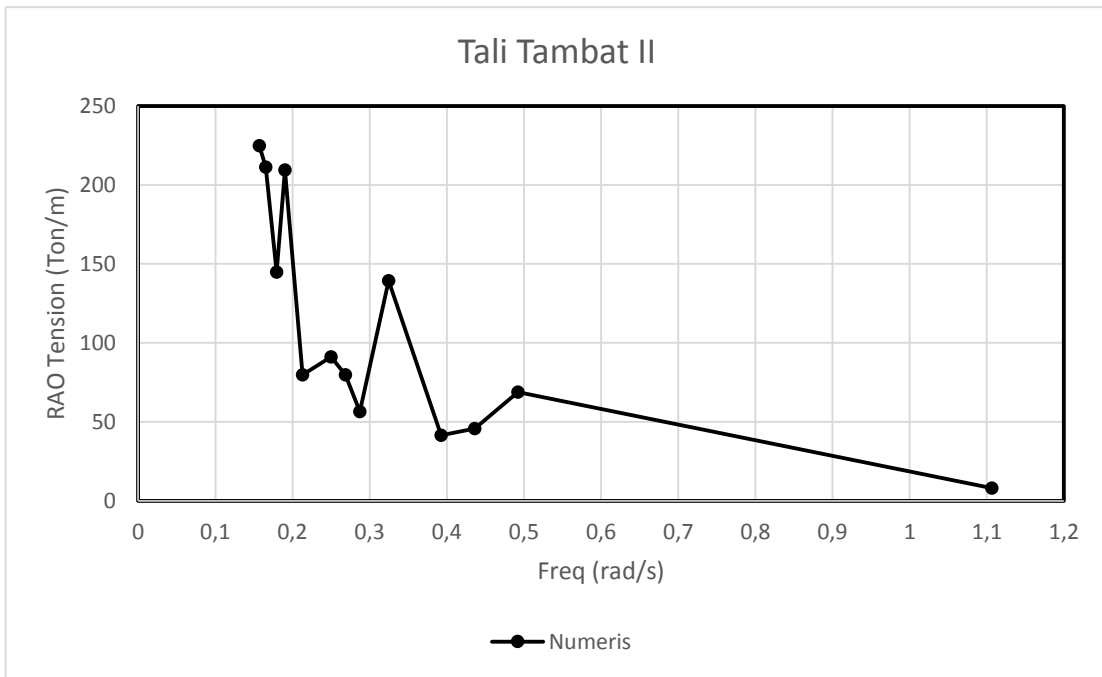
bantuan perangkat lunak *Ansys Aqwa*. Properti tali tambat yang ada pada Tabel 4.19 dimasukkan pada program *Ansys Aqwa* sehingga dihasilkan *tension* tali yang terjadi per satuan waktu (*time domain*), selanjutnya perlu dicari *amplitude tension* pada periode tertentu yang diplot pada frekuensi domain sehingga dihasilkan respon *tension* tali yang terjadi dalam bentuk RAO. Gambar 4.55 berikut ini merupakan permodelan dari tali tambat yang digunakan pada model dengan menggunakan *Ansys Aqwa*.



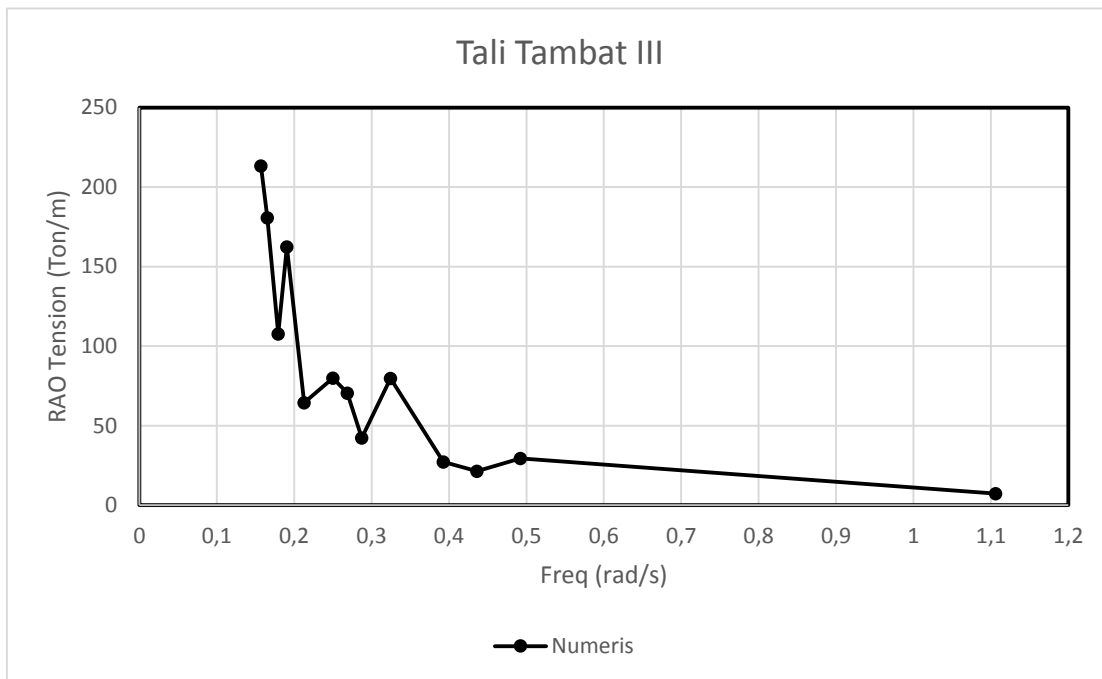
Gambar 4.55 Pemodelan Tali Tambat dengan Menggunakan Ansys Aqwa.



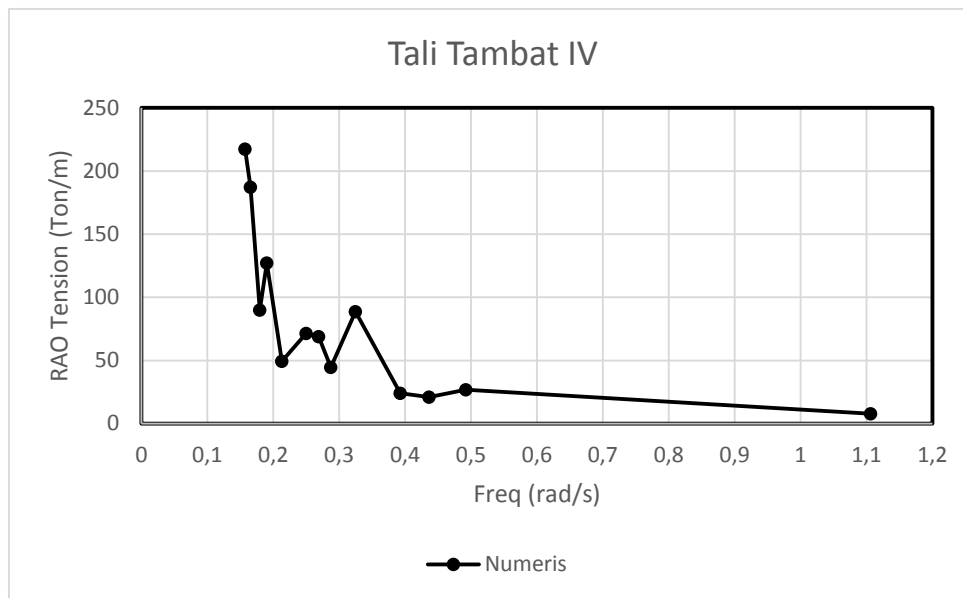
Gambar 4.56 RAO *Tension* Tali Tambat I Metode Numeris.



Gambar 4.57 *RAO Tension* Tali Tambat II Metode Numeris.



Gambar 4.58 *RAO Tension* Tali Tambat III Metode Numeris.



Gambar 4.59 RAO *Tension* Tali Tambat IV Metode Numeris.

Tabel 4.46 *Tension Force* Maksimum Tiap Tali Tambat pada *Ansys Aqwa*.

Deskripsi	<i>Frequency</i> (rad/s)	RAO <i>Tension Force</i> (ton/m)
<i>Mooring Line I</i>	0.324	139.395
<i>Mooring Line II</i>	0.324	139.395
<i>Mooring Line III</i>	0.324	79.701
<i>Mooring Line IV</i>	0.324	88.557

4.8.2 *Tension* Tali Metode Eksperimen

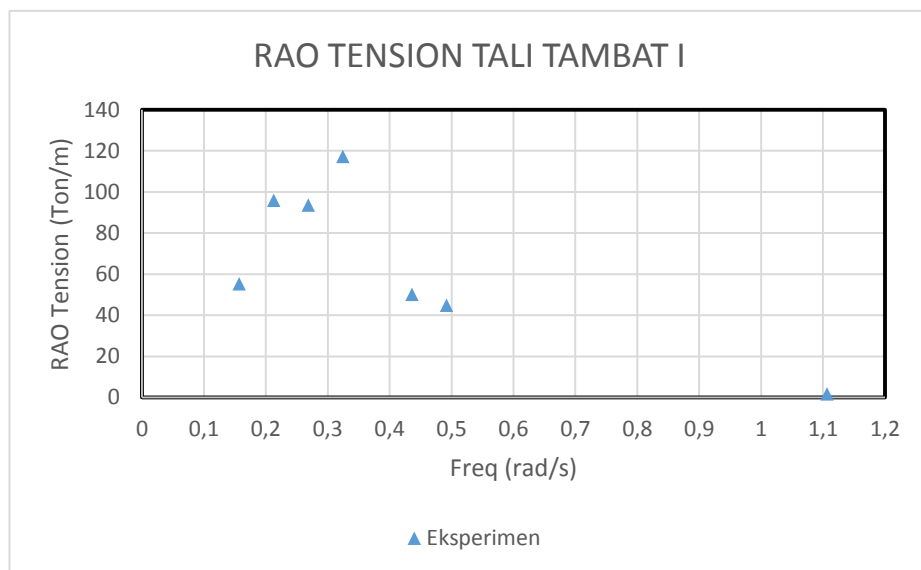
Analisa eksperimen dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS dengan menggunakan kolam berdimensi panjang 100 m, lebar 3 m, dan tinggi 1.8 m. Eksperimen SPAR pada kondisi tertambat dilakukan dengan konfigurasi seperti pada Gambar 4.48. *Load cell* yang digunakan merupakan *loadcell* dengan kapasitas 1 kg dan 5 kg yang dipasang pada jangkar yang dihubungkan tali tambat. Gelombang yang digunakan dihasilkan oleh *wave maker* dengan tinggi gelombang 5 cm. Model diuji dengan tujuh variasi periode yang ditunjukkan pada Tabel 4.30. Penentuan periode yang digunakan pengujian berdasarkan hasil penskalaan dari periode gelombang sesungguhnya.

A. Load Cell 1

Setiap *time history* yang dihasilkan instrumen *load cell* 1 pada setiap eksperimen di analisa dengan metode FFT (*Fast Fourier Transform*) untuk mengetahui besarnya tegangan tali pada tali tambat 1 akibat beban gelombang. Analisa dengan metode FFT dilakukan pada setiap periode yang dilakukan pada eksperimen. Tabel 4.47 menunjukkan hasil analisa FFT yang merupakan nilai respon *tension* tali tambat 1 setiap periode pada eksperimen serta gambar 4.60 merupakan grafik RAO *tension* dari tali tambat I metode eksperimen.

Tabel 4.47 Data *Load Cell* 1 Hasil Eksperimen.

No.	Kode	RAO Tension (ton/m)	Periode (s)
1	TT1	55.224	3.60
2	TT2	95.982	2.60
3	TT3	93.571	2.10
4	TT4	117.313	1.70
5	TT5	50.149	1.30
6	TT6	44.776	1.10
7	TT7	1.658	0.50



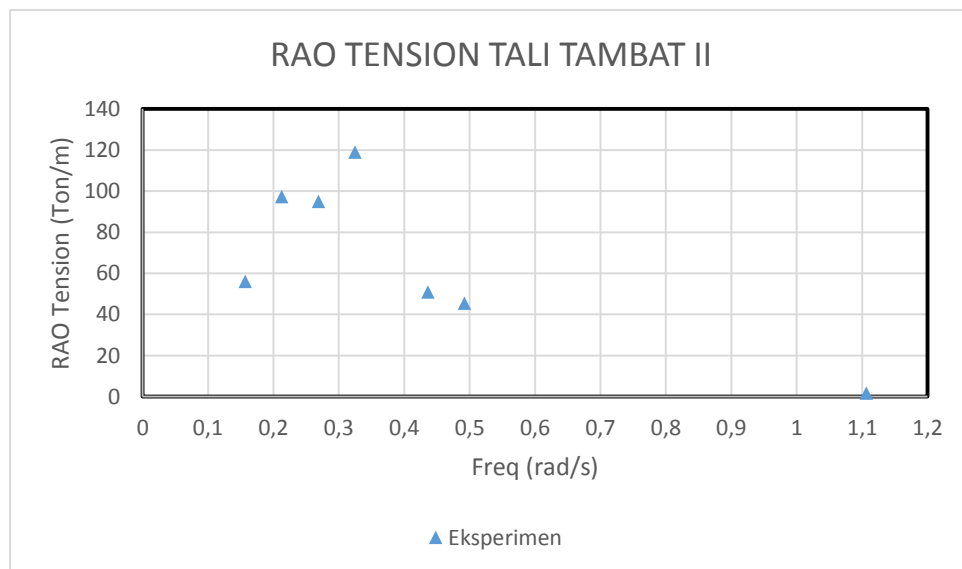
Gambar 4.60 Grafik RAO *Tension* Tali Tambat I Metode Eksperimen.

B. Load Cell 2

Setiap *time history* yang dihasilkan instrumen *load cell 2* pada setiap eksperimen di analisa dengan metode FFT (*Fast Fourier Transform*) untuk mengetahui besarnya *tension* tali pada tali tambat II akibat beban gelombang. Analisa dengan metode FFT dilakukan pada setiap periode yang dilakukan pada eksperimen. Tabel 4.48 menunjukkan hasil analisa FFT yang merupakan nilai respon *tension* tali tambat II setiap periode pada eksperimen serta Gambar 4.61 merupakan grafik RAO *tension* dari tali tambat II metode eksperimen.

Tabel 4.48 Data *Load Cell 2* Hasil Eksperimen.

No.	Kode	RAO Tension (ton/m)	Periode (s)
1	TT1	56.061	3.60
2	TT2	97.436	2.60
3	TT3	94.988	2.10
4	TT4	119.091	1.70
5	TT5	50.909	1.30
6	TT6	45.455	1.10
7	TT7	1.684	0.50



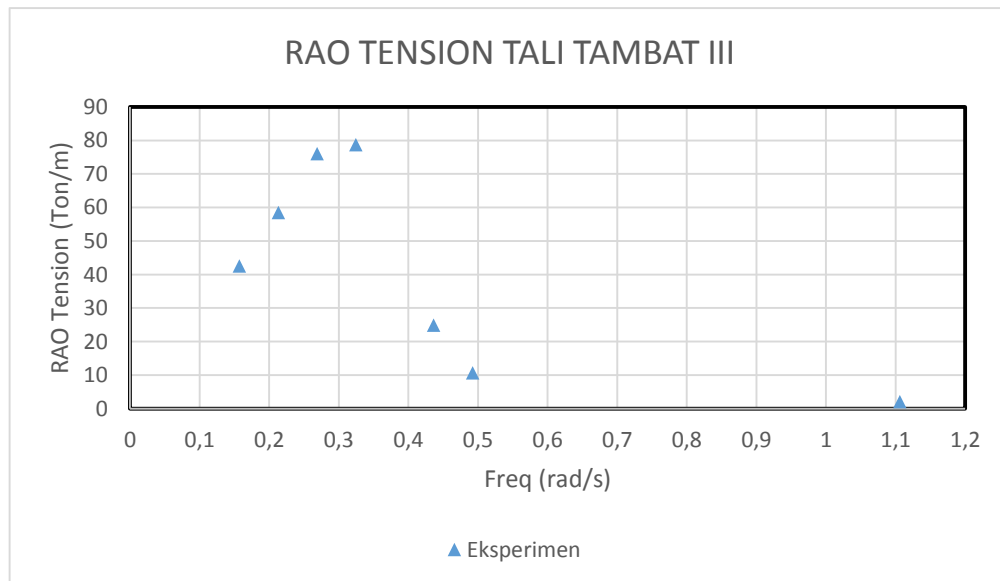
Gambar 4.61 Grafik RAO *Tension* Tali Tambat II Metode Eksperimen.

C. Load Cell 3

Setiap *time history* yang dihasilkan instrumen *load cell* 3 pada setiap eksperimen di analisa dengan metode FFT (*Fast Fourier Transform*) untuk mengetahui besarnya *tension* tali pada tali tambat III akibat beban gelombang. Analisa dengan metode FFT dilakukan pada setiap periode yang dilakukan pada eksperimen. Tabel 4.49 menunjukkan hasil analisa FFT yang merupakan nilai respon *tension* tali tambat III setiap periode pada eksperimen serta Gambar 4.62 merupakan grafik RAO *tension* dari tali tambat III metode eksperimen.

Tabel 4.49 Data *Load Cell* 3 Hasil Eksperimen.

No.	Kode	RAO Tension (ton/m)	Periode (s)
1	TT1	42.520	3.60
2	TT2	58.493	2.60
3	TT3	76.040	2.10
4	TT4	78.740	1.70
5	TT5	24.882	1.30
6	TT6	10.709	1.10
7	TT7	2.100	0.50



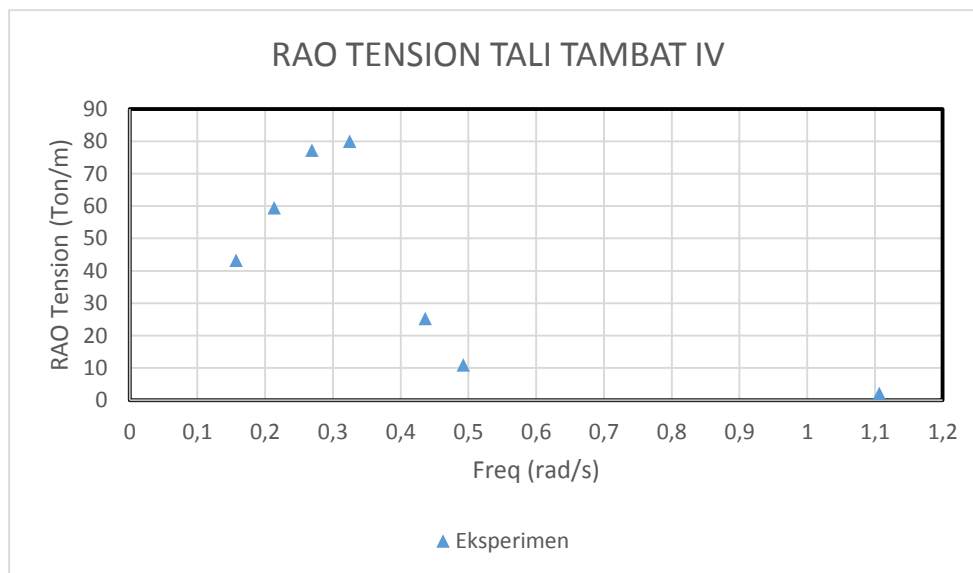
Gambar 4.62 Grafik RAO *Tension* Tali Tambat III Metode Eksperimen.

D. Load Cell 4

Setiap *time history* yang dihasilkan instrumen *load cell* 4 pada setiap eksperimen di analisa dengan metode FFT (*Fast Fourier Transform*) untuk mengetahui besarnya *tension* tali pada tali tambat IV akibat beban gelombang. Analisa dengan metode FFT dilakukan pada setiap periode yang dilakukan pada eksperimen. Tabel 4.50 menunjukkan hasil analisa FFT yang merupakan nilai respon *tension* tali tambat IV setiap periode pada eksperimen serta Gambar 4.63 merupakan grafik RAO *Tension* dari tali tambat IV metode eksperimen.

Tabel 4.50 Data *Load Cell* 4 Hasil Eksperimen.

No.	Kode	RAO Tension (gr)	Periode (s)
1	TT1	43.200	3.60
2	TT2	59.429	2.60
3	TT3	77.257	2.10
4	TT4	80.000	1.70
5	TT5	25.280	1.30
6	TT6	10.880	1.10
7	TT7	2.133	0.50

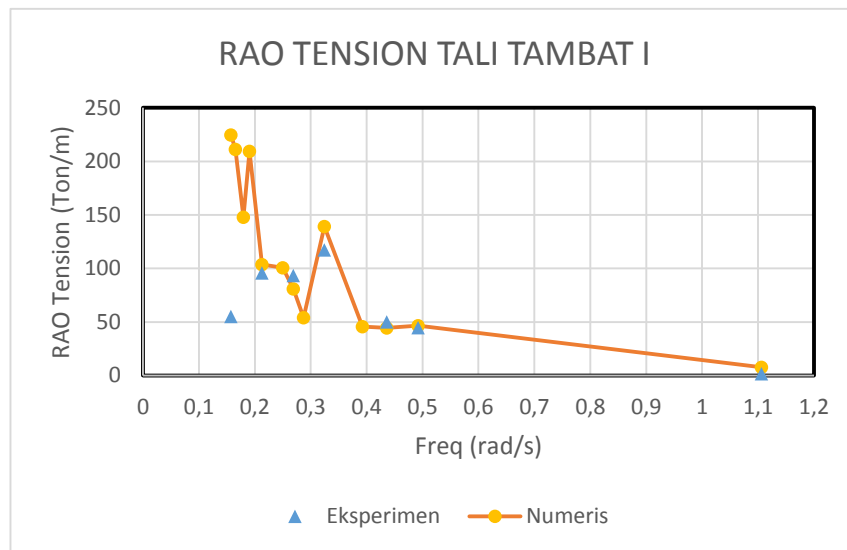


Gambar 4.63 Grafik RAO *Tension* Tali Tambat IV Metode Eksperimen.

4.8.3 Perbandingan *Tension* Tali Metode Numeris dengan Tertambat

Pada Gambar 4.64 merupakan perbandingan RAO *tension* dari metode numeris dan eksperimen pada tali tambat I. Gambar 4.65 menunjukkan perbandingan RAO *tension* dari metode numeris dan eksperimen pada tali tamat II. Gambar 4.66 menunjukkan perbandingan RAO *tension* dari metode numeris dan eksperimen pada tali tambat III. Gambar 4.67 menunjukkan perbandingan RAO *tension* dari metode numeris dan eksperimen pada tali tambat IV.

A. Tali Tambat I



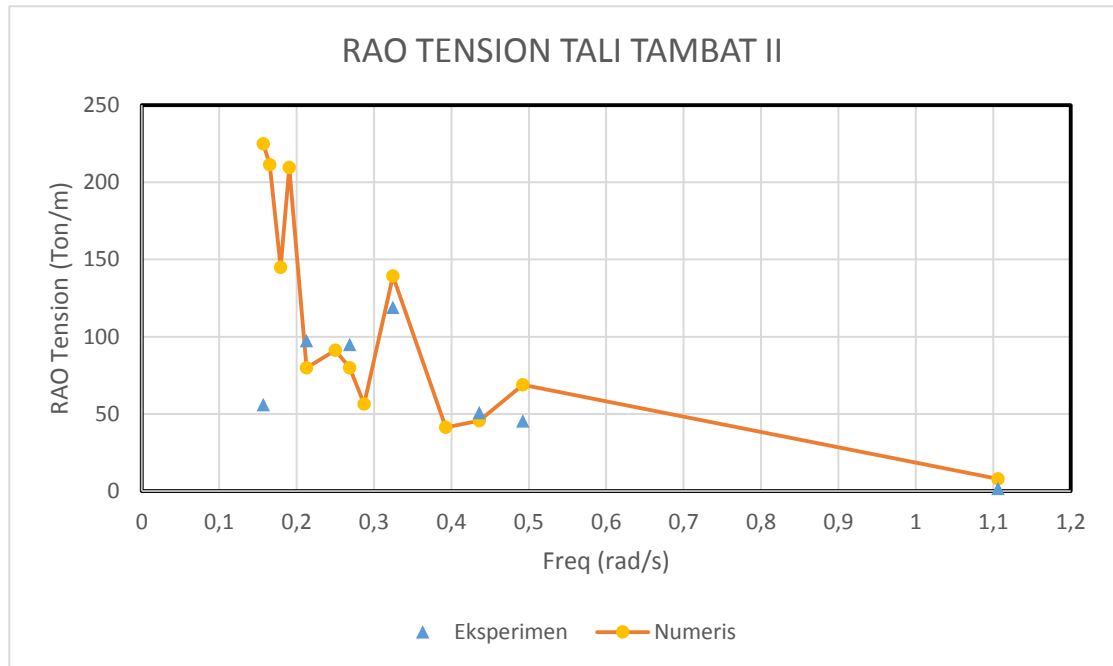
Gambar 4.64 Grafik Perbandingan RAO *Tension* Tali Tambat I Metode Numeris dan Eksperimen.

Menurut Gambar 4.64 analisa metode numeris dan eksperimen menunjukkan posisi nilai *tension* maksimum yang berbeda. Nilai respon tertinggi metode numeris dan eksperimen pada tali tambat I dapat dilihat pada Tabel 4.51.

Tabel 4.51 Nilai Perbandingan RAO *Tension* Tali Tambat 1 Metode Numeris dan Eksperimen.

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO <i>Tension</i> (ton/m)
Numerik	0.157	224.811
Eksperimen	0.324	117.313

B. Tali Tambat II



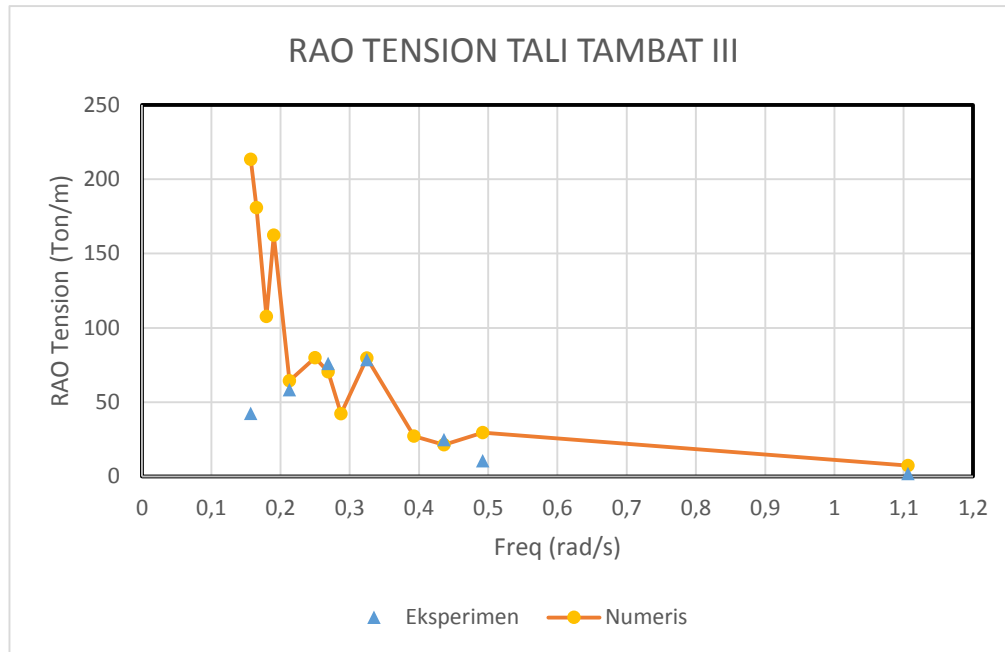
Gambar 4.65 Grafik Perbandingan RAO *Tension* Tali Tambat II Metode Numeris dan Eksperimen.

Menurut Gambar 4.65 analisa metode numeris dan eksperimen menunjukkan posisi nilai *tension* maksimum yang berbeda. Nilai respon tertinggi metode numeris dan eksperimen pada tali tambat II dapat dilihat pada Tabel 4.52.

Tabel 4.52 Nilai Perbandingan RAO *Tension* Tali Tambat 2 Metode Numeris dan Eksperimen.

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO <i>Tension</i> (ton/m)
Numerik	0.157	224.811
Eksperimen	0.324	119.091

C. Tali Tambat III



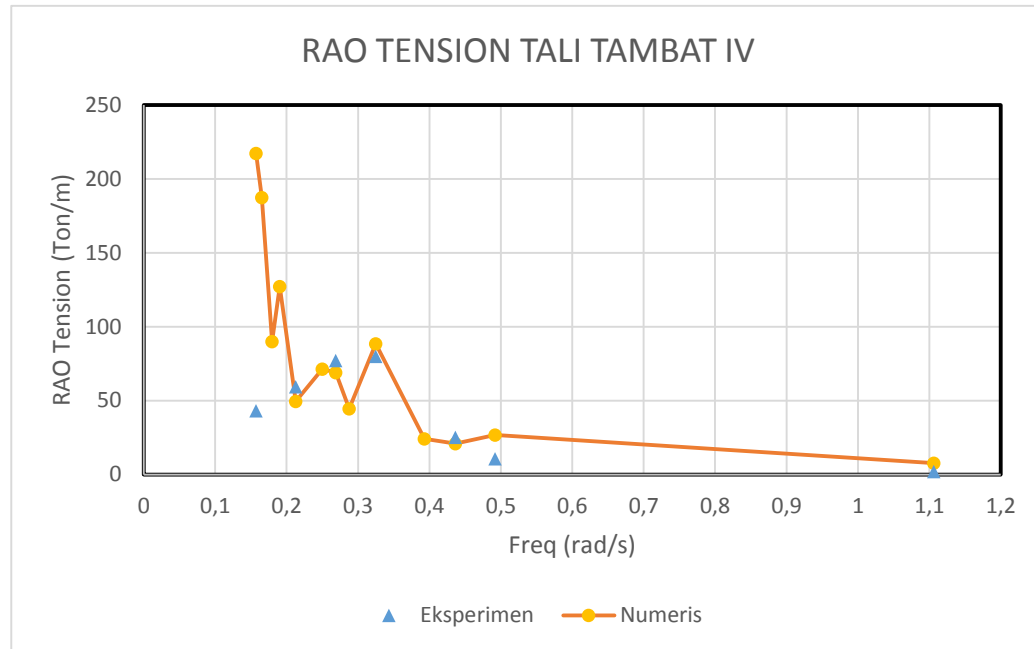
Gambar 4.66 Grafik Perbandingan RAO *Tension* Tali Tambat III Metode Numeris dan Eksperimen.

Menurut Gambar 4.66 analisa metode numeris dan eksperimen menunjukkan posisi nilai *tension* maksimum yang berbeda. Nilai respon tertinggi metode numeris dan eksperimen pada tali tambat III dapat dilihat pada Tabel 4.53.

Tabel 4.53 Nilai Perbandingan RAO *Tension* Tali Tambat III Metode Numeris dan Eksperimen.

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO <i>Tension</i> (ton/m)
Numerik	0.157	213.29
Eksperimen	0.324	100.00

D. Tali Tambat IV



Gambar 4.67 Grafik Perbandingan RAO *Tension* Tali Tambat IV Metode Numeris dan Eksperimen.

Menurut Gambar 4.67 analisa metode numeris dan eksperimen menunjukkan posisi nilai *tension* maksimum yang berbeda. Nilai respon tertinggi metode numeris dan eksperimen pada tali tambat IV dapat dilihat pada Tabel 4.54.

Tabel 4.54 Nilai Perbandingan RAO *Tension* Tali Tambat IV Metode Numeris dan Eksperimen.

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO <i>Tension</i> (Ton/m)
Numerik	0.157	217.33
Eksperimen	0.324	100.00

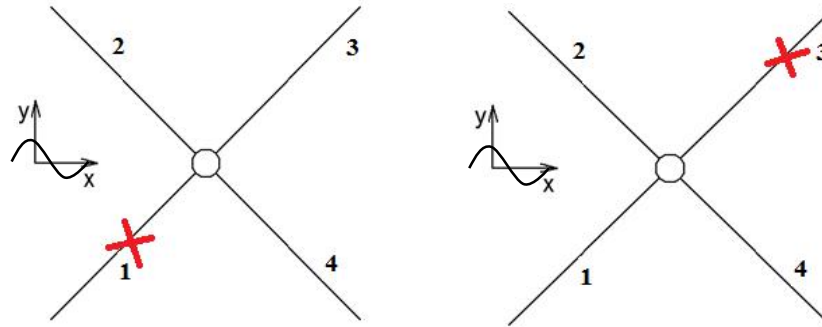
4.9 ANALISIS *TENSION* TALI PADA KONDISI *ACCIDENTAL*

4.9.1 Kondisi *Accidental*

Pada penelitian ini dilakukan analisa *accidental*, hal ini bertujuan untuk membandingkan *tension* tali tambat struktur pada kondisi *intact* dan kondisi *accidental*. Pada analisa ini menggunakan bantuan perangkat lunak *OrcaFlex*. Data masukkan yang digunakan pada *OrcaFlex* berupa RAO struktur pada

kondisi terapung bebas. Kondisi *accidental* merupakan kondisi dimana salah satu tali tambat terputus.

Setelah salah satu tali tambat terputus, dianalisis tali tambat lainnya yang tersisa. Kondisi *accidental* dibagi menjadi kondisi *accidental* 1 dan kondisi *accidental* 2, lebih tepatnya dapat melihat Gambar 4.68 yang merupakan skenario kondisi *accidental*.



Gambar 4.68 Skenario Kondisi *Accidental*.

4.9.2 Analisis *Tension*

Analisis yang dilakukan pada kondisi *accidental* ini hanya menguji saat frekuensi 0.324 rad/s. Hal ini karena pada frekuensi 0.324 rad/s *tension* tali mengalami kenaikan yang signifikan. Pada analisa *tension* tali ini, dilakukan analisa *intact* terlebih dahulu agar dapat mengetahui pada detik seberapa tali mengalami *tension* terbesar sehingga dapat direncanakan putus pada detik tersebut. Pada kondisi *accidental* 1 diputus pada detik 1028 dengan *tension* maksimum 415.90 ton. Sedangkan pada kondisi *accidental* 2 diputus pada detik 877.543 dengan *tension* maksimum 399.71 ton.

Menurut API RP 2 SK tentang *station keeping system for floating structure* disebutkan bahwa untuk *tension* tali terdapat batas *tension* dan *safety factor* pada kondisi *intact* maupun *damage*, hal ini dapat dilihat pada Tabel 4.55.

Tabel 4.55 Batas *Tension* dan *Safety Factor*.

	<i>Analysis Method</i>	<i>Tension Limit</i> (% of MBL)	<i>Safety Factor</i>
<i>Intact</i>	<i>Dynamic</i>	60	1.67
<i>Damage</i>	<i>Dynamic</i>	80	1.25

Sedangkan berdasarkan Tabel 4.19, MBL dari tali yang digunakan sebesar 11760 kN atau setara dengan 1200 ton. Sehingga dapat diketahui batas *tension* yang diijinkan pada kondisi *intact* maupun kondisi *damage*.

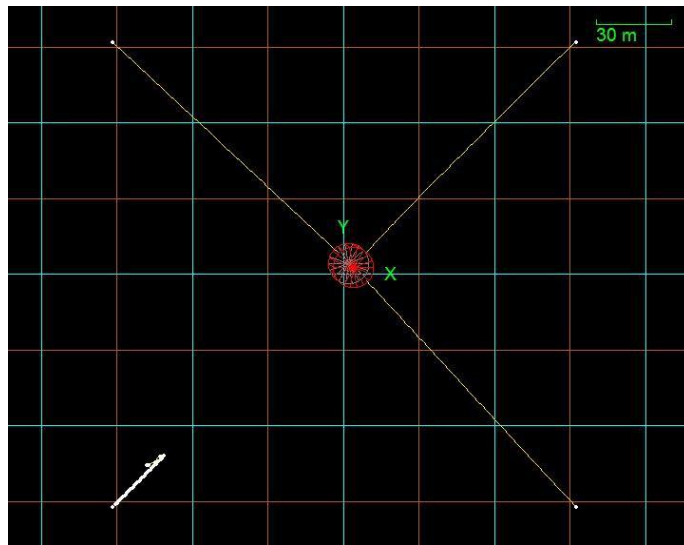
$$Tension\ allowable = \frac{MBL}{SF} \quad (4.10)$$

$$Tension\ allowable = \frac{1200}{1.25}$$

$$Tension\ allowable = 960\ ton$$

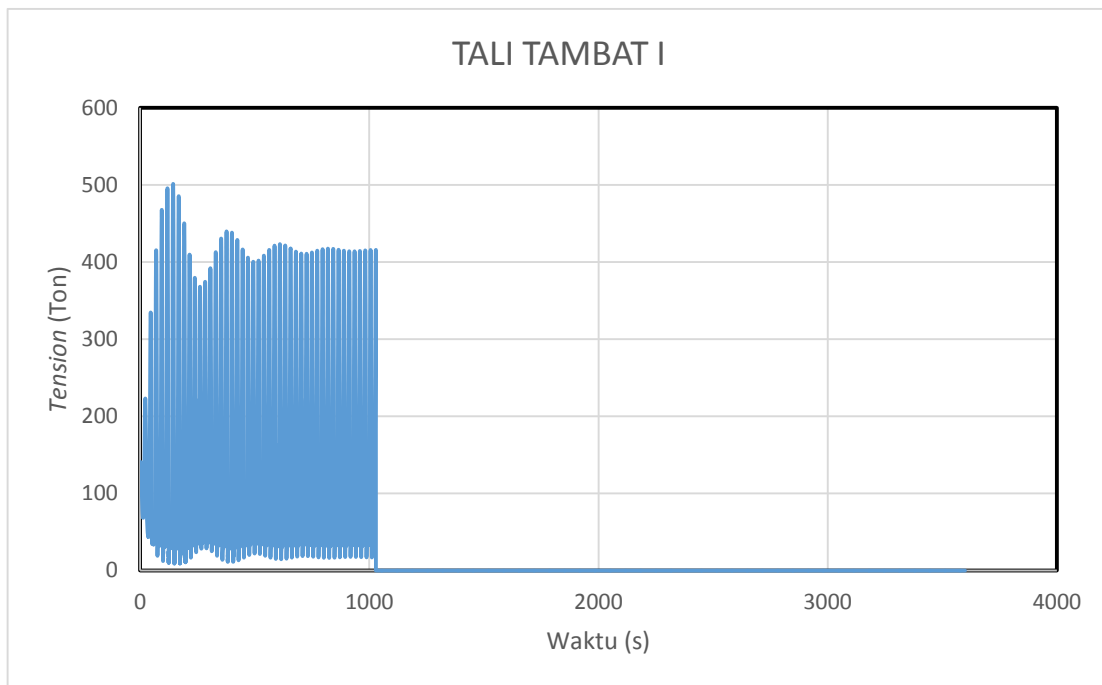
4.9.3 Kondisi Accidental 1 Metode Numeris

Model numeris setelah putusnya tali tambat 1 dapat dilihat pada Gambar 4.69.

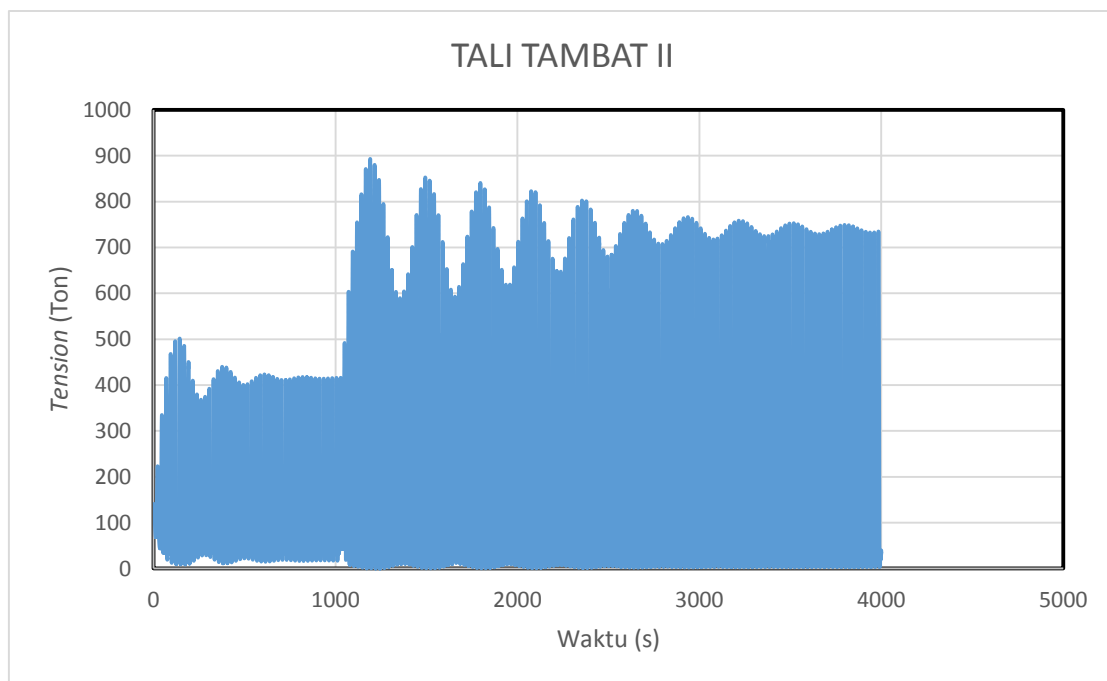


Gambar 4.69 Model Numeris *Accidental 1*.

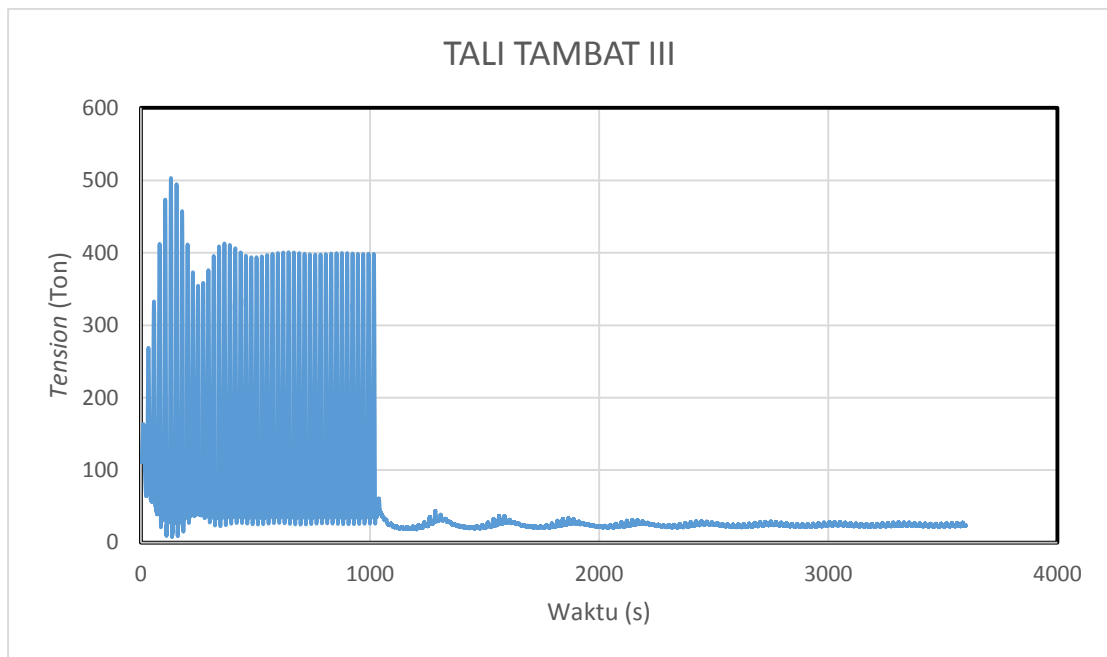
Hasil grafik *tension* tali pada saat tali tambat I putus dapat dilihat pada Gambar 4.70, 4.71, 4.72, 4.73.



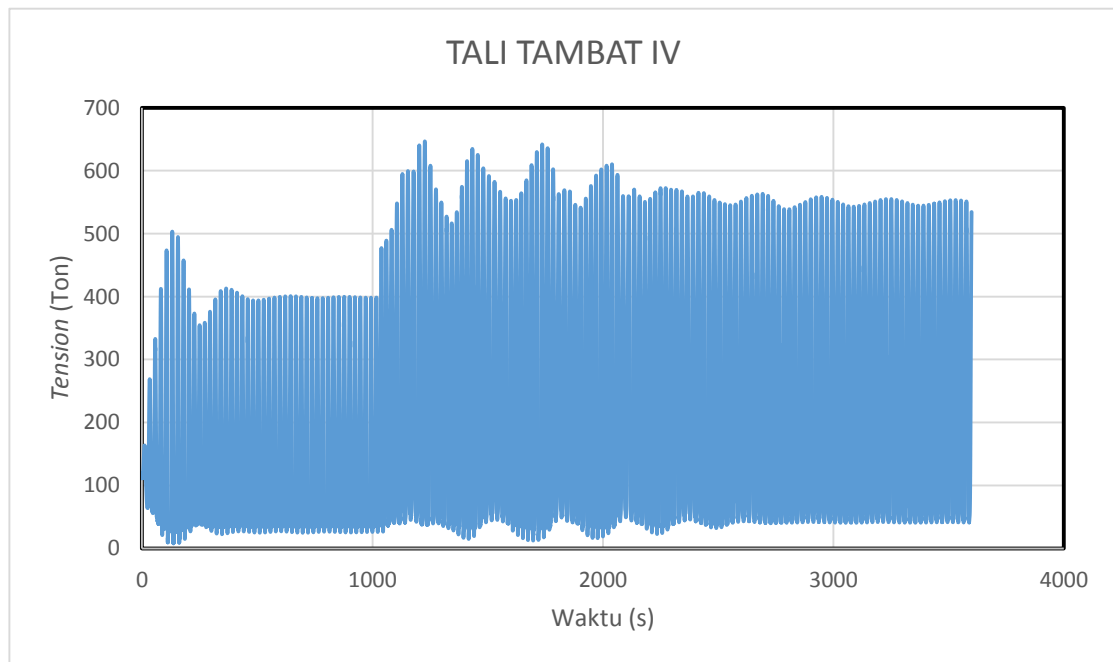
Gambar 4.70 Grafik *Tension* Tali Tambat I Kondisi *Accidental* 1.



Gambar 4.71 Grafik *Tension* Tali Tambat II Kondisi *Accidental* 1.



Gambar 4.72 Grafik *Tension* Tali Tambat III Kondisi *Accidental*.



Gambar 4.73 Grafik *Tension* Tali Tambat IV Kondisi *Accidental* 1.

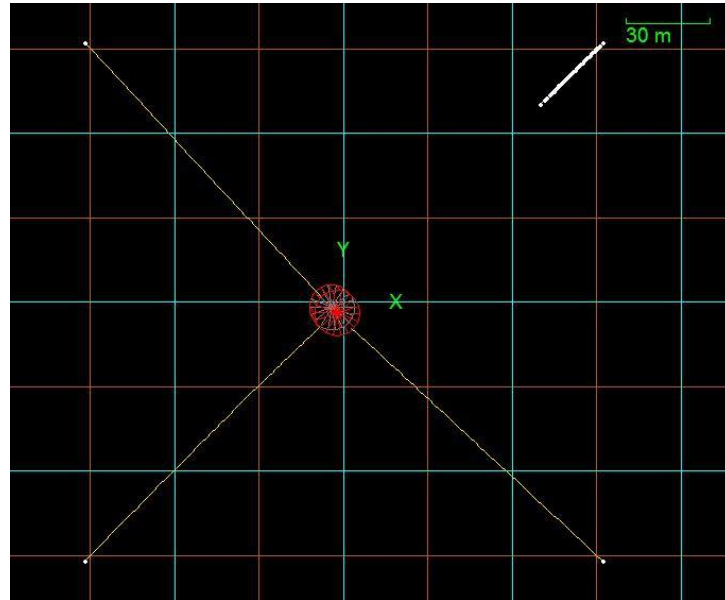
Tabel 4.56 Hasil Analisis Tegangan Kondisi *Accidental 1*.

	Kondisi <i>Intact</i>		Transient	Posisi Akhir	
	Avg (ton)	Max (ton)	Max (ton)	Avg (ton)	Max (ton)
Tali Tambat I	136.79	415.90	0	0	0
Tali Tambat II	136.79	415.90	893.06	235.53	746.41
Tali Tambat III	115.80	399.71	398.46	24.11	40.11
Tali Tambat IV	115.80	399.71	646.53	237.61	552.00

Ditinjau dari tabel 4.56, kondisi *accidental 1* didapatkan hasil *tension* tertinggi pada tali tambat II. Kemudian tali tambat III yang memiliki posisi simetri dengan tali tambat I yang di putus mengalami penurunan *tension*. Sedangkan untuk tali tambat IV juga mengalami kenaikan *tension* namun lebih kecil daripada tali tambat II. Hal ini karena posisi tali II di depan arah datang gelombang.

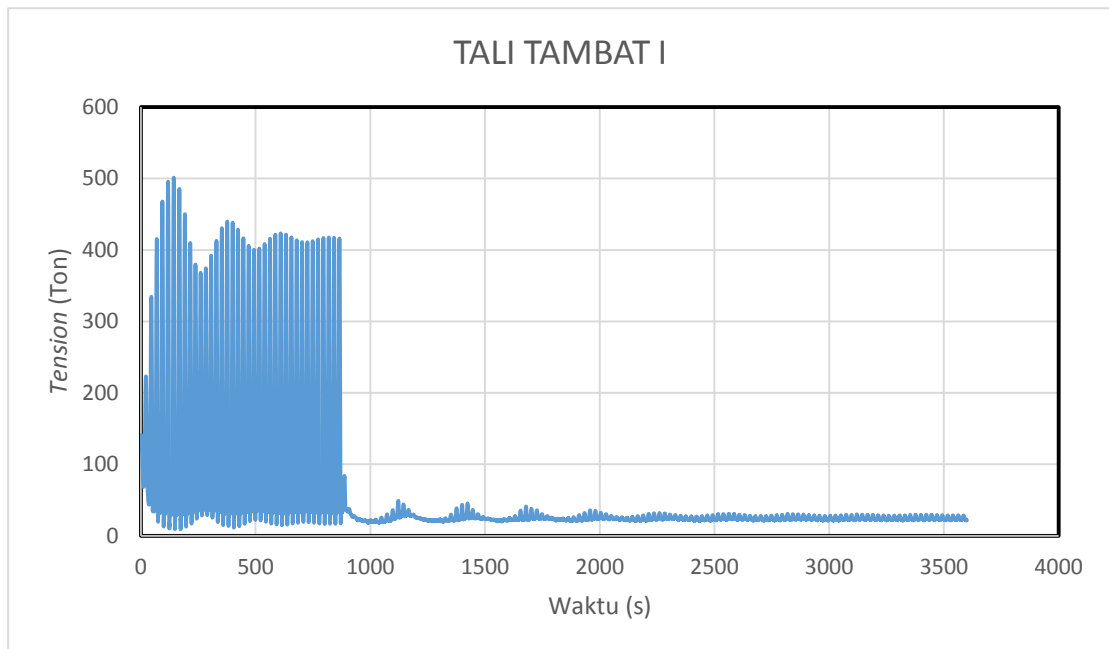
4.9.4 Kondisi *Accidental 2* Metode Numeris

Model numeris setelah putusnya tali tambat III dapat dilihat pada Gambar 4.74.

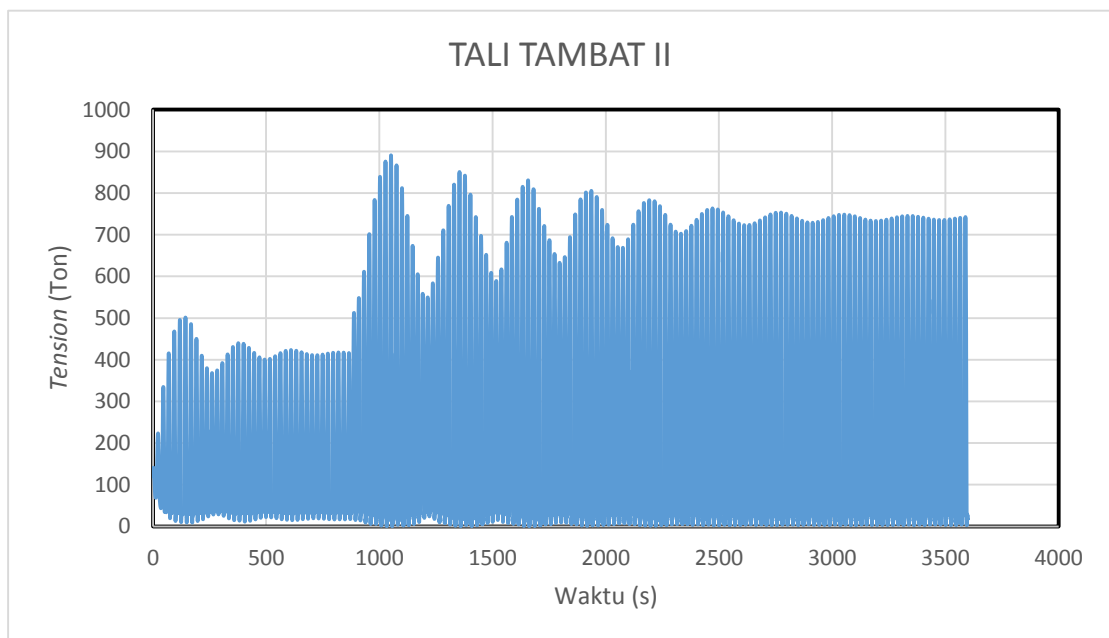


Gambar 4.74 Model Numeris *Accidental 2*.

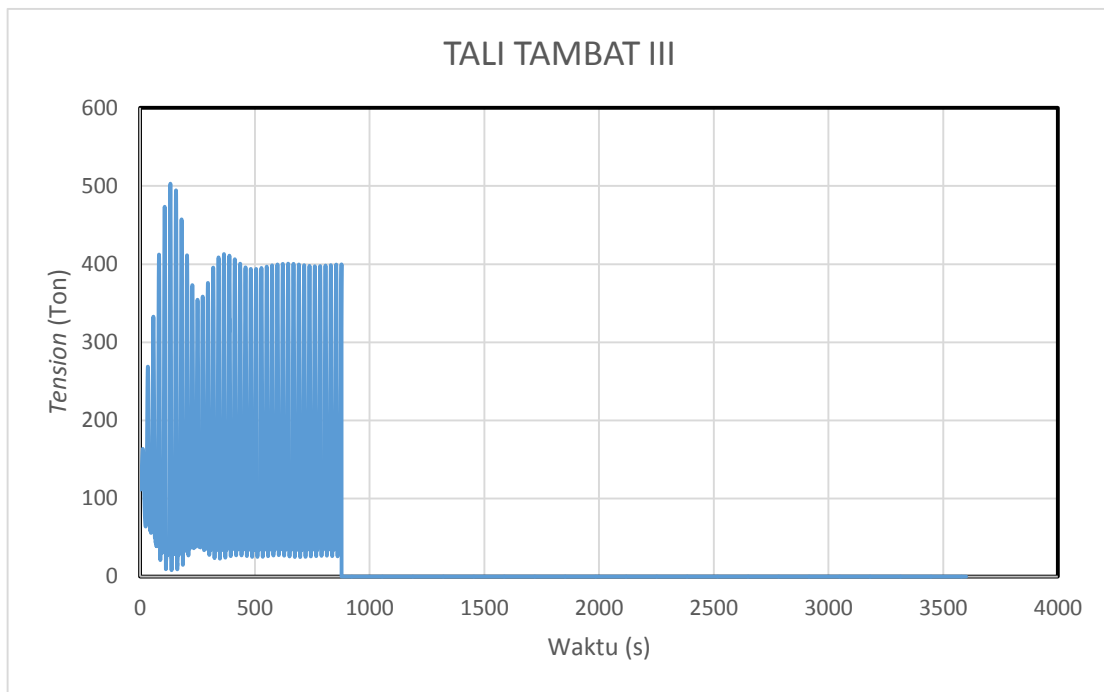
Hasil grafik *tension* tali pada saat tali tambat III putus dapat dilihat pada Gambar 4.75, 4.76, 4.77, 4.78.



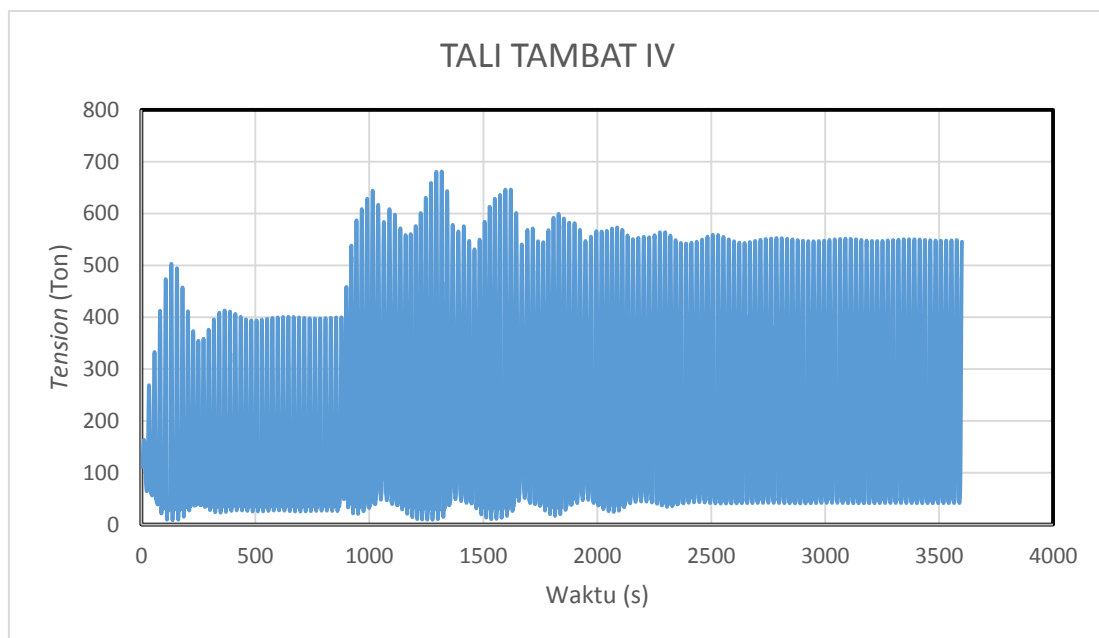
Gambar 4.75 Grafik Tension Tali Tambat I Kondisi *Accidental 2*.



Gambar 4.76 Grafik *Tension* Tali Tambat II Kondisi *Accidental 2*.



Gambar 4.77 Grafik *Tension* Tali Tambat III Kondisi *Accidental 2*.



Gambar 4.78 Grafik *Tension* Tali Tambat IV Kondisi *Accidental 2*.

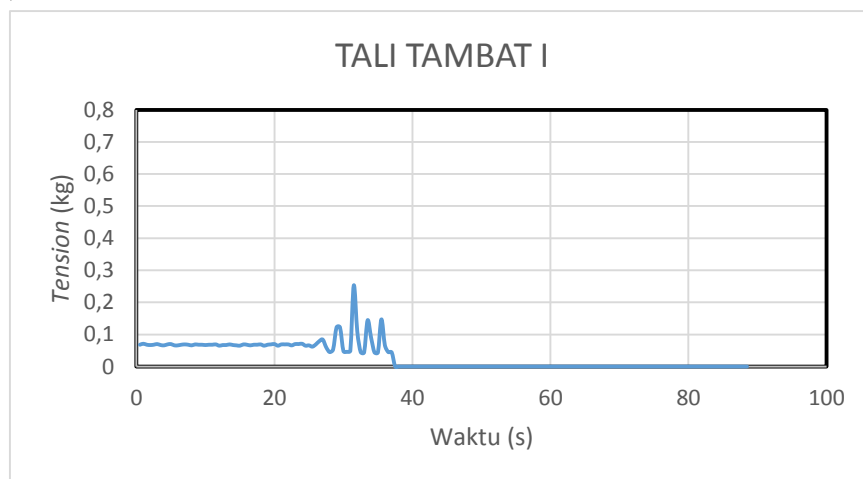
Tabel 4.57 Hasil Analisis *Tension* Kondisi *Accidental 2*.

	Kondisi Intact		Transient	Posisi Akhir	
	Avg (ton)	Max (ton)	Max (ton)	Avg (ton)	Max (ton)
Tali Tambat I	136.79	415.90	423.26	24.33	29.45
Tali Tambat II	136.79	415.90	890.51	235.33	743.26
Tali Tambat III	115.80	399.71	0	0	0
Tali Tambat IV	115.80	399.71	681.12	237.57	549.90

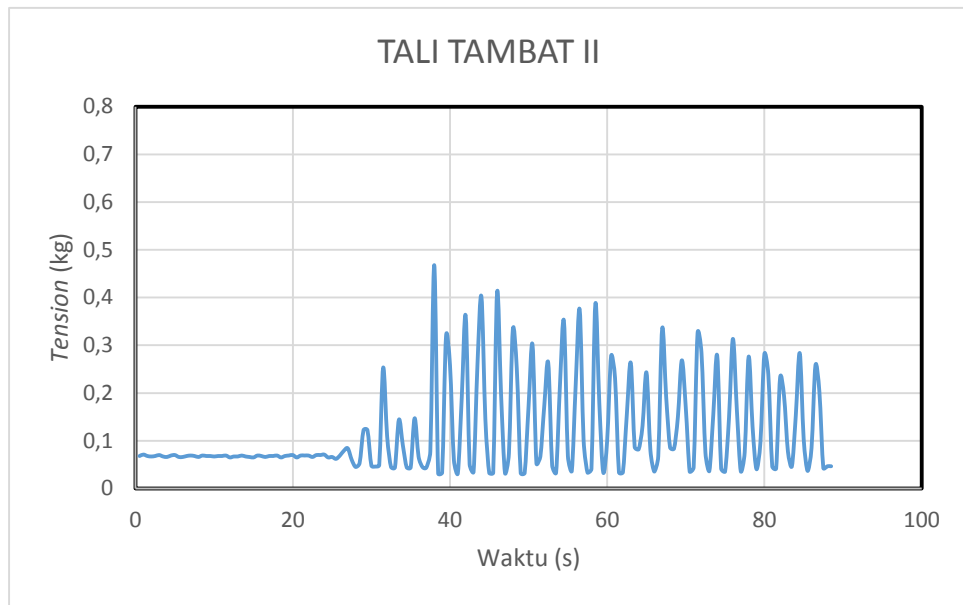
Ditinjau dari Tabel 4.57, kondisi *accidental 2* didapatkan hasil *tension* tertinggi pada tali tambat II. Kemudian tali tambat I yang memiliki posisi simetri dengan tali tambat III yang di putus mengalami penurunan *tension*. Sedangkan untuk tali tambat IV juga mengalami kenaikan *tension* namun lebih kecil daripada tali tambat II.

4.9.5 Kondisi *Accidental 1* Metode Eksperimen

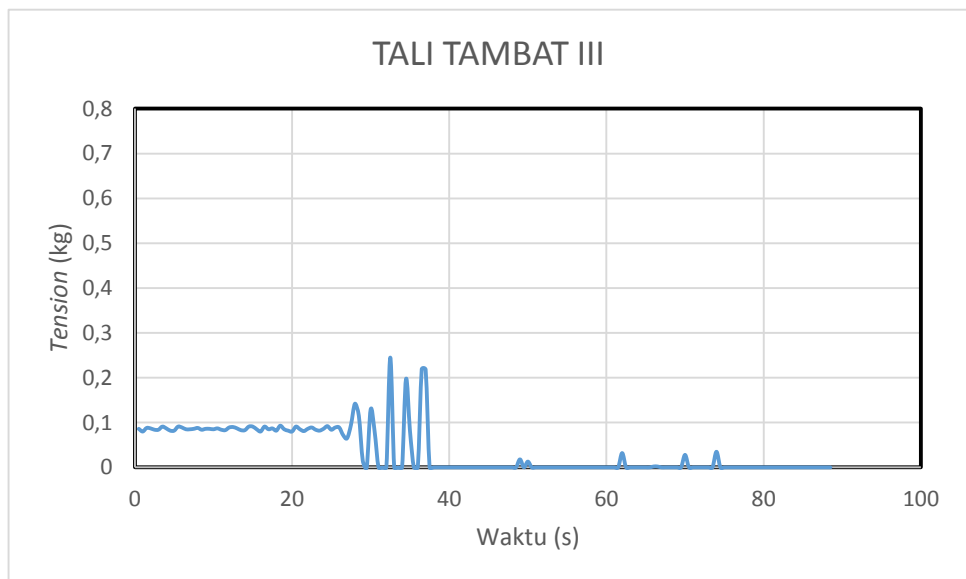
Analisis eksperimen dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS dengan menggunakan kolam berdimensi panjang 100 m, lebar 3 m, dan tinggi 1.8 m. Gelombang yang digunakan untuk kondisi ini pada frekuensi 0.324 dengan tinggi gelombang 5 cm. Pada kondisi ini tali tambat diputus dengan gunting pada saat bersamaan dengan puncak gelombang. Hasil grafik *tension* tali pada saat tali tambat 1 putus dapat dilihat pada Gambar 4.79, 4.80, 4.81, 4.82.



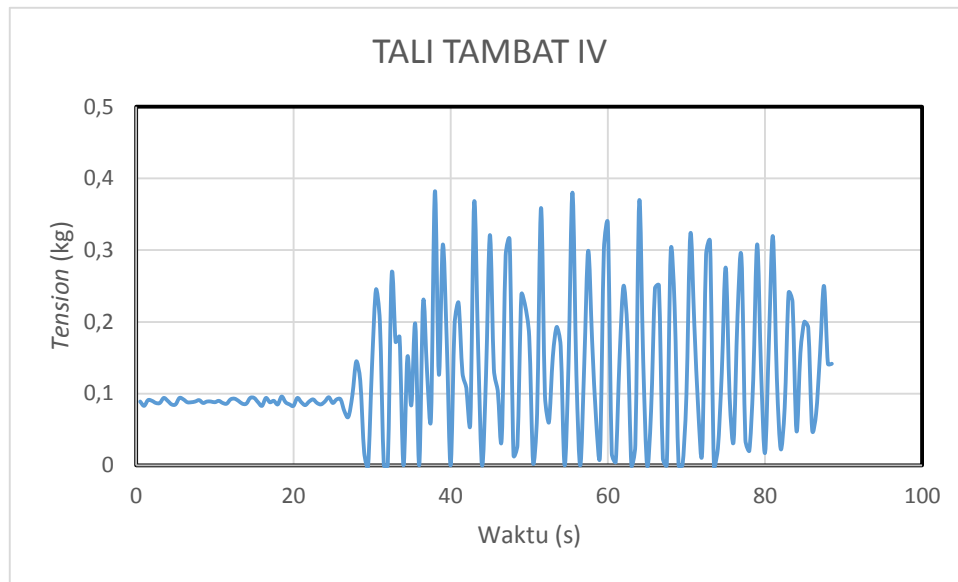
Gambar 4.79 Grafik *Tension* Tali Tambat I Kondisi *Accidental 1* Eksperimen.



Gambar 4.80 Grafik *Tension* Tali Tambat II Kondisi *Accidental 1* Eksperimen.



Gambar 4.81 Grafik *Tension* Tali Tambat III Kondisi *Accidental 1* Eksperimen.



Gambar 4.79 Grafik *Tension* Tali Tambat IV Kondisi *Accidental* 1 Eksperimen.

Tabel 4.58 Hasil Analisis *Tension* Kondisi *Accidental* 1.

	Kondisi <i>Intact</i>		<i>Trancient</i>	Posisi Akhir	
	Avg (ton)	Max (ton)	Max (ton)	Avg (ton)	Max (ton)
Tali Tambat I	133.84	332.30	0	0	0
Tali Tambat II	133.84	332.30	914.06	287.70	804.19
Tali Tambat III	107.50	294.92	68.35	2.48	25.39
Tali Tambat IV	106.86	294.87	746.48	286.38	719.82

Pada kondisi *accidental* eksperimen tali tambat I diputus ketika pada gelombang puncak mengenai struktur. Ditinjau dari Tabel 4.58, saat tali tambat I diputus tali tambat II mengalami kenaikan yang signifikan. Sedangkan tali tambat III yang posisinya simetri dengan tali tambat I mengalami penurunan yang signifikan. Hal ini sama dengan kondisi *accidental* metode numeris.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

PENUTUP

5.1 KESIMPULAN

Setelah analisis hasil penelitian ini pada bab sebelumnya, maka dari penelitian ini dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Studi numeris dan eksperimen pada kondisi terapung bebas menghasilkan RAO yang sesuai. Untuk gerak *surge* struktur SPAR *helical strakes* naik sebesar 8% daripada SPAR tanpa *helical strakes*. Untuk gerak *heave* struktur *helical strakes* turun sebesar 70% daripada SPAR tanpa *helical strakes*. Untuk gerak *pitch* struktur SPAR *helical strakes* turun sebesar 17% daripada SPAR tanpa *helical strakes*.
2. Studi numeris dan eksperimen gerak SPAR kondisi tertambat menghasilkan nilai RAO yang sesuai, walaupun pada periode besar hasil eksperimen tidak sesuai hal ini disebabkan karena gelombang yang dibangkitkan sedikit. Untuk *tension* tali, *tension* tertinggi terjadi pada tali tambat I dan tali tambat II karena berada tepat di depan arah datang gelombang.
3. Studi numeris dan eksperimen pada kondisi *accidental* menghasilkan *tension* paling besar pada tali tambat yang berada tepat di depan arah datang gelombang. Untuk tali tambat yang posisinya simetri dengan tali tambat yang putus mengalami penurunan *tension*. *Tension* maksimum pada kondisi *accidental* 1 sebesar 893.06 ton, sedangkan pada *accidental* 2 sebesar 890.51 ton. Untuk eksperimen *tension* maksimum sebesar 914.06 ton. *Tension* maksimum semua kondisi masih dapat diterima karena masih di bawah *tension* yang diijinkan sebesar 960 ton.

5.2 SARAN

Berdasarkan hasil yang telah dicapai penulis dalam penelitian ini, didapatkan beberapa saran untuk penelitian kedepannya yaitu sebagai berikut:

1. Pengujian dengan beban arus perlu dilakukan karena *helical strakes* juga berpengaruh terhadap beban arus.

2. Dalam melakukan eksperimen lebih baik menggunakan *probe*, agar dapat mengetahui bahwa gelombang yang dibangkitkan *wave maker* sesuai dengan yang ada di komputer.
3. Pada analisa tegangan tali sebaiknya ditambahkan *spring* pada sistem tegangan tali agar hasilnya lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- Agarwal, A., & Jain, A. (2003). *Dynamic Behavior of offshore spar platform under regular sea waves*. Ocean Engineering, 487-516.
- Aprillian, Salis S. 2012. *Membangun(kan) Perusahaan Energi Nasional*. Jakarta: Petromindo Creative Solution.
- Blevins, Robert D. 2001. *Flow Induced Vibration*. Florida: Krieger Publishing Company.
- Chen, X. H., & Zhang, J. (1999). Coupled Time-Domain Analysis of the Response of a Spar and Its Mooring System. *Proceedings of the Ninth (1999) International Offshore and Polar Engineering Conference* (pp. 293-300). Brest, France: International Society of Offshore and Polar Engineers.
- Diaz, Naufal. 2017. *Studi Analitis, Numerik, dan Eksperimen Olah Gerak SPAR dan Dinamika Tegangan Sistem Tambat Tipe Taut pada Kondisi Kegagalan Tali Tambat*. Surabaya: Tugas Akhir Departemen Teknik Kelautan, ITS.
- Djarmiko, E. B. (2012). *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak*. Surabaya : ITSpress.
- Faltinsen, O. M. (1990). *Sea Loads on Ships and Offshore Structure*. Cambridge: University of Cambridge.
- Islam, A. S., Jameel, M., Jumaat, M. Z. & Salman, F. A., 2012. Review of offshore energy in Malaysia and floating Spar platform for sustainable exploration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 6268-6284.
- Journee, J., & Massie, W. (2001). *Offshore Hydromechanics* (1st ed). Delft: TU Delft.
- Jun, B. R., & Hang, S. C. (2002). Heave and Pitch Motions of a Spar Platform with Damping Plate. *Proceedings of the Twelfth (2002) International Offshore and*

- Polar Engineering Conference* (pp. 198-201). Kitakyushu, Japan: International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE).
- Kim, M.-H., 2012. *Spar Platform Technology and Analysis Methods*. Virginia: ASCE.
- Montasir, O. A., Anurag, Y., & Kurian, V. J. (2016). Effect of Mooring Line Pretension on the Dynamic Response of Truss Spar Platforms. *Proceedings of the Twenty-Sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference* (pp. 1061-1066). Rhodes, Greece: International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE).
- Prasiwi, Rizki Amalia. 2014. *Analisis Perilaku FPSO (Floating Production Storage and Offloading) Terhadap Internal Turret Mooring System Berbasis Simulasi Time Domain*. Surabaya: Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan, ITS.
- Qinwei et al. 2017. *Research on the Influence of Helical Strakes and Its Parameters on Dynamic Response of Platform of Floating Wind Turbine Based on Optimazation Method of Orthogonal Design*. University of Shanghai for Scienci ang Technology, China.
- Ran, Z., Kim, M. H., Niedzwecki, J., &Johnson, R. P. (1995). Response of a Spar Platform in Random Waves and Currents. *Proceedings of the Fifth (1995) International Offshore and Polar Engineering Conference* (pp. 363-371). The Hauge, Netherland: The International Society of Offshore and Polar Engineers.
- Rho, Jun B., and Hang S. Choi. 2003. "An Experimental Study For Mooring Effects on the Stability of SPAR Platform." *Proceedings of the Thirteenth (2003) International Offshore and Polar Engineering Conference*. Honolulu: The International Society of Offshore and Polar Engineers .
- Sarpkaya, T. (2010). *Wave Forces on Offshore Structures*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Stendal, L. C., 2015. *Analysis Methods for Mooring Systems with focus on Accidental Limit State*. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology

BIODATA PENULIS



Ahmad Sabilul Muttaqin dilahirkan di Jombang pada 12 September 1995 merupakan putra keempat dari Bapak Sapari dan Ibu Sri Sunarti. Penulis menempuh pendidikan formal di MI- Al Asy'ari (2002–2008), SMP Negeri 1 Diwek (2008-2011), SMA Negeri 3 Jombang (2011-2014). Kemudian penulis pada 2014 melanjutkan pendidikan di Departemen Teknik Kelautan ITS. Dalam masa perkuliahan di Departemen Teknik Kelautan penulis aktif dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan (Himatekla) dan Lembaga Dakwah Jurusan Bahrul Ilmi. Dalam himpunan mahasiswa teknik kelautan, penulis menjabat sebagai staff Departemen Inovasi Karya (2015-2016) dan sebagai ketua Departemen Inovasi Karya (2016-2017). Sedangkan dalam organisasi lembaga dakwah jurusan penulis aktif sebagai staff Departemen Pendidikan (2015-2016). Penulis pada tahun 2017 diberi kesempatan untuk kerja praktik di PT Bakrie Metal Industrie di bidang engineering. Kemudian pada tahun 2018 penulis menjadi pengurus Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS, sekaligus menyelesaikan tugas akhir dengan melakukan studi eksperimen dan numeris pada bangunan SPAR *Helical Strakes*.

Email: ahmadsabilul95@gmail.com

LAMPIRAN A

TABULASI DISTRIBUSI MASSA (TITIK BERAT DAN GIRASI)

Data Spar		
ID	12.80000256	cm
OD	14.00000256	cm
Draft	108.0076406	cm
Length	123.3676437	cm
Fairlead Depth	10.19124013	cm
Length	40	cm
Width	40	cm
Height	15.65257456	cm
Depth A	731.4287177	cm
Depth B	182.8571794	cm
KG	49.61768611	cm
Pitch Radius	49.17639079	cm
Roll Radius	49.17639079	cm

Perhitungan Model

Bagian		Tebal (cm)	Berat (g)	Jumlah	Total (g)
Blok A	Ballast 1	2	1628.49	1	1628.489876
	Ballast 2	2	1623.09	1	1623.089876
	Ballast 3	2.5	2094.09	1	2094.089876
	Ballast 4	1	663.5899	1	663.5898755
	Cap	0.3	47.46	1	47.46
Blok B	Ballast 1	2.5	2096.69	1	2096.689876
	Ballast 2	0.8	465.9899	1	465.9898755
	Ballast 3	0.5	179.4899	1	179.4898755
Topside		0.3	599.5	1	599.5
Tambahan	Ulir		352.0899	1	352.0898755
	Pipa	-	4087.53	1	4087.529853
	Penyambung	-		1	0
	Helical Stakes		96.64	3	289.92
	Mur	-		2	0
Total					14127.93

Perhitungan VCG

1. Blok A

Bagian	Tebal (cm)	VCG from keel (cm)	Massa (g)	Momen (g.cm)
Ballast 1	2	6.8	1628.49	11073.73115
Ballast 2	2	4.8	1623.09	7790.831403
Ballast 4	1	3.3	2094.09	6910.496589
Ballast 3	2.5	1.6	663.5899	1028.564307
Cap	0.3	0.2	47.46424	7.119635947
Total			6056.724	26810.74309

$$\text{VCG Blok A} = \frac{\text{Momen massa}}{\text{massa}} = 4.426608 \text{ cm dari keel}$$

3. Tambahan

Bagian	Tebal (cm)	VCG from keel (cm)	Massa (g)	Momen (g.cm)
Ulir (130 cm)	-	65.3	352.0899	22991.46887
Pipa	-	61.7	4087.53	252200.5919
Helical 1	-	54.0	96.64	5218.54397
Helical 2	-	54.0	96.64	5218.54397
Helical 3	-	54.0	96.64	5218.54397
Topside	0.3	123.55	599.5	74068.225
Total			5329.039	364915.9177

$$\text{VCG tambahan} = \frac{\text{Momen massa}}{\text{massa}} = 68.47687 \text{ cm dari keel}$$

4. Total

Bagian	Tebal (cm)	VCG from keel (cm)	Massa	Momen
Blok A	-	4.4	6056.724	26810.74309
Blok B	-	110.2	2742.17	302134.8265
Tambahan	-	68.5	5329.039	364915.9177
Total			14127.93	693861.4873

$$\text{VCG total} = \frac{\text{Momen massa}}{\text{massa}} = 49.11274 \text{ cm dari keel}$$

$$\text{Error} = \frac{\text{Model-Teori} - \text{Teori}}{\text{Teori}} \times 100\% = -1.0\% \text{ memenuhi}$$

Perhitungan Girasi

Bagian		LCG (cm)	TCG (cm)	VCG from keel (cm)	Ditinjau dari COG (cm)	Massa (g)	Iox (g.cm)	Ioy (g.cm)	y^2+z^2	x^2+z^2	$w*(y^2+z^2)$	$w*(x^2+z^2)$	Ix (g.cm)	Iy (g.cm)
Blok A	Ballast 1	0.0	0.0	6.5	-42.6	1628.5	16446.1	16446.1	1815.8	1815.8	2957086.4	2957086.4	2973532.5	2973532.5
	Ballast 2	0.0	0.0	4.5	-44.6	1623.1	16391.5	16391.5	1990.3	1990.3	3230430.5	3230430.5	3246822.0	3246822.0
	Ballast 3	0.0	0.0	3.0	-46.1	2094.1	20624.6	20624.6	2126.4	2126.4	4452841.2	4452841.2	4473465.8	4473465.8
	Ballast 4	0.0	0.0	1.3	-47.9	663.6	6826.0	6826.0	2290.8	2290.8	1520179.6	1520179.6	1527005.6	1527005.6
	Cap	0.0	0.0	0.2	-49.0	47.5	471.3	471.3	2397.4	2397.4	113788.4	113788.4	114259.7	114259.7
Blok B	Ballast 7	0.0	0.0	112.1	62.9	179.5	1756.6	1756.6	3961.1	3961.1	710977.1	710977.1	712733.6	712733.6
	Ballast 6	0.0	0.0	111.4	62.3	466.0	4556.9	4556.9	3879.7	3879.7	1807902.1	1807902.1	1812459.0	1812459.0
	Ballast 5	0.0	0.0	109.8	60.6	2096.7	20748.5	20748.5	3676.9	3676.9	7709270.9	7709270.9	7730019.4	7730019.4
Tambahan	Ulir	0.0	0.0	65.3	16.2	352.1	495874.0	495874.0	262.0	262.0	92257.2	92257.2	588131.2	588131.2
	Pipa	0.0	0.0	61.7	12.6	4087.5	5287070.0	5287070.0	158.4	158.4	647624.4	647624.4	5934694.4	5934694.4
	Helical 1	7.8	0.0	54.0	4.9	96.6	101469.2	101469.2	83.9	23.9	8112.7	2308.3	109581.9	103777.5
	Helical 2	4.3	6.8	54.0	4.9	96.6	101469.2	101469.2	41.9	70.3	4053.8	6790.0	105523.1	108259.3
	Helical 3	4.3	6.8	54.0	4.9	96.6	101469.2	101469.2	41.9	70.3	4053.8	6790.0	105523.1	108259.3
	Topside	0.0	0.0	123.6	74.4	599.5	79937.8	79937.8	5540.9	5540.9	3321772.8	3321772.8	3401710.6	3401710.6
Total													32835461.9	32835129.9

5. Jari Jari Girasi

Rxx= 48.2095 cm

Ryy= 48.2092 cm

6. Check error

Err Rxx= -1.97% memenuhi

Err Ryy= -1.97% memenuhi

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN B

DESIAN TALI TAMBAT

- PEMILIHAN SPESIFIKASI WIRE ROPE

4

WIRE ROPE

ROPE SPECIFICATIONS

SPIRAL STRAND

4.34

- Designed to improve service life
- Surface finish: hot dip galvanised
- Sheathing: HDPE yellow colour with longitudinal dark stripe
- Tensile grades of wire optimised to improve wire ductility
- Rope, size, mass and MBF may be customised according to project design requirements
- Supply includes: Quality plan - Fatigue design calculations
Wear design calculation - Corrosion design calculation



Wire rope dia		Mass (unsheathed)		Mass (sheathed)		Metallic Area mm ²	MBF kN	Stiffness MN	Torque 25% MBF Nm	Turns 25% MBF
Uncoated mm	Sheathed mm	Air kg/m	Sea water kg/m	Air kg/m	Sea water kg/m					
77	91	29	25	32	25	3440	5480	525	750	0.5
83	99	34	29	37	29	4000	6370	610	950	0.5
89	105	39	33	42	33	4600	7330	700	1200	0.4
96	114	46	38	49	38	5350	8530	820	1500	0.4
102	122	51	43	55	43	6040	9360	925	1750	0.4
108	128	58	49	61	48	6770	10490	1035	2100	0.4
115	137	65	55	69	54	7680	11760	1175	2500	0.3
121	145	72	61	76	60	8500	12720	1300	2850	0.3
127	151	80	67	84	66	9370	13930	1435	3300	0.3
134	160	89	75	93	73	10430	15510	1595	3850	0.3
140	168	97	82	101	79	11390	16930	1740	4400	0.3
147	175	107	90	112	88	12550	18660	1920	5100	0.3

All dimensions are approximate

Spasifikasi wire rope dipilih

Diameter	115	mm
Masa jenis (udara)	65	kg/m
Masa jenis (air)	55	kg/m
MBF	11760	kN
Kekakuan	1175	MN

- MODULUS ELASTISITAS SENAR PANCING (NYLON 6)
ENGINEERING TOOLBOX

Material	Tensile Modulus (E) (Young's Modulus, Modulus of Elasticity)		Ultimate Tensile Strength - σ_u - (MPa)	Yield Strength - σ_y - (MPa)
	(10^6 psi)	(GPa)		
ABS plastics		1.4 - 3.1	40	
A106 Seamless Carbon Steel Pipe - Grade A			400	248
Aluminum	10.0	69	110	95
Aluminum Alloys	10.2			
Nickel Silver	18.5			
Nickel Steel	29			
Niobium (Columbium)	15			
Nylon-6		2 - 4	45 - 90	45
Nylon-66			60 - 80	
Oak Wood (along grain)		11		
Osmium (Os)	80	550		
Phenol-formaldehyde molding compounds			45 - 52	

Sesuai bahan senar pancing yaitu dengan menggunakan nylon 6. Maka modulus elastisitasnya adalah 2 Gpa.

LAMPIRAN C

PENGUKURAN PERIODE GERAK PENDULUM SPAR

No	PERIODE			
	Dengan Massa Tambahan		Tanpa Massa Tambahan	
	Periode 10 kali Getaran	Periode 1 kali getaran	Periode10 kali Getaran	Periode 1 kali getaran
1	34	3.4	34.5	3.45
2	34.2	3.42	34.2	3.42
3	34.3	3.43	35.1	3.51
4	34.3	3.43	34.2	3.42
5	34.4	3.44	34.6	3.46
6	34.3	3.43	34.4	3.44
7	34.3	3.43	34.2	3.42
8	34.4	3.44	34.7	3.47
9	34.7	3.47	34.5	3.45
10	34.7	3.47	34.7	3.47
11	33.9	3.39	34.5	3.45
12	33.9	3.39	34.5	3.45
13	34.3	3.43	34.3	3.43
14	33.9	3.39	34.7	3.47
15	34	3.4	34.2	3.42
16	34.3	3.43	34.7	3.47
17	34.5	3.45	34.5	3.45
18	34.4	3.44	34.6	3.46
19	34.4	3.44	34.9	3.49
20	34.4	3.44	35	3.5
21	34.5	3.45	35	3.5
22	34.5	3.45	35	3.5
23	34.2	3.42	34.9	3.49
24	34.2	3.42	35	3.5
25	34.4	3.44	34.9	3.49
26	34.5	3.45	34.9	3.49
27	34.4	3.44	34.5	3.45
28	34.4	3.44	34.5	3.45
29	34.5	3.45	34.8	3.48
30	34.5	3.45	35	3.5
31	34.6	3.46	35	3.5
32	34.2	3.42	35.2	3.52
33	34	3.4	34.7	3.47
34	34.1	3.41	34.5	3.45
35	34.4	3.44	34.7	3.47

PENGUKURAN PERIODE GERAK PENDULUM SPAR
(LANJUTAN)

No	PERIODE			
	Dengan Massa Tambahan		Tanpa Massa Tambahan	
	Periode 10 kali Getaran	Periode 1 kali getaran	Periode10 kali Getaran	Periode 1 kali getaran
36	34.3	3.43	34.2	3.42
37	34.5	3.45	35	3.5
38	34.5	3.45	35	3.5
39	34.1	3.41	35.2	3.52
40	34.6	3.46	35	3.5
41	34.5	3.45	34.5	3.45
42	34.7	3.47	34.7	3.47
43	34.7	3.47	34.7	3.47
44	34.6	3.46	34.7	3.47
45	34.4	3.44	34.7	3.47
46	34.2	3.42	34.6	3.46
47	34	3.4	34.6	3.46
48	34	3.4	34.5	3.45
49	34.3	3.43	35	3.5
50	34.4	3.44	35	3.5

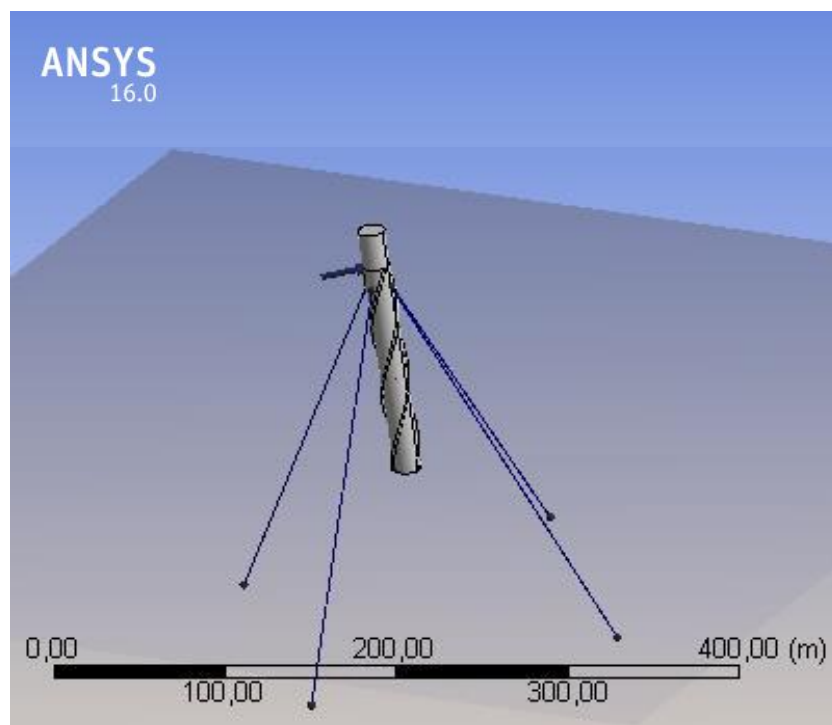
LAMPIRAN D

INPUT DAN OUTPUT ANSYS AQWA TERAPUNG BEBAS DAN TERTAMBAT



Project

Name	Project
Data Folder Root	Tugas Akhir
Date of Creation	19/04/2018 17:13:29
Last Modified	01/07/2018 13:18:01
Global Control	50
Geometric Features	50
Connections	50
Environment Features	50
Product Version	16.0 RELEASE



Units

TABLE 1

Length	Metre
Mass	Kilograms
Rotational Velocity	Degrees
Force	Newton
Frequency	Hertz
Time	Second

Model (A3, B3)

Geometry

TABLE 2

Model (A3, B3) > Geometry

Object Name	<i>Geometry</i>
State	Fully Defined
Details of Geometry	
Attached Assembly Name	C:\Users\pc\AppData\Local\Temp\WB_OPRESPC_pc_10436_2\unsaved_project_files\dp0\AQW\DM\AQW.agdb
Sea Geometry	
Water Depth	225 m
Water Density	1025 kg/m ³
Water Size X	1000 m
Water Size Y	1000 m
Import Preferences	
Import Solid Bodies	No
Import Surface Bodies	Yes
Import Line Bodies	Yes

Part 3

TABLE 3

Model (A3, B3) > Geometry > Part

Object Name	<i>Part 3</i>
State	Fully Defined
Details of Part 3	
Part Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Total Structural Mass	26837614,91 kg
X Position of COG	-6,82280340697616E-04 m
Y Position of COG	6,81083125527948E-04 m
Z Position of COG	-69,76 m
Generate Internal Lid	No
Current Calculation Depth	0.0 m
Fixity Options	
Structure Fixity	Structure is Free to Move

Force Factors	
Drag Factor	1
Mass Factor	1
Slam Factor	0.0
Advanced Options	
Submerged Structure Detection	Program Controlled
Override Calculated GMX	No
Override Calculated GMY	No
Non-Linear Roll Damping	
Non-Linear Roll Damping	Excluded from Calculations

TABLE 4
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Body

Object Name	<i>Surface Body</i>
State	Fully Defined
Details of Surface Body	
Body Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Structure Type	Physical Geometry
Surface Type	Program Controlled

TABLE 5
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Body

Object Name	<i>Surface Body</i>
State	Fully Defined
Details of Surface Body	
Body Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Structure Type	Physical Geometry
Surface Type	Program Controlled

TABLE 6
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Axes

Object Name	<i>Part 3 Axes</i>
State	Fully Defined
Details of Part 3 Axes	
Visibility	Visible
Alignment Method	Global Axes
Rotation About Global Z	0.0°
Rotation About Local Y	0.0°
Rotation About Local X	0.0°
Unit Vector X	[1, 0.0, 0.0]
Unit Vector Y	[0.0, 1, 0.0]
Unit Vector Z	[0.0, 0.0, 1]

TABLE 7
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Body

Object Name	<i>Surface Body</i>
State	Fully Defined
Details of Surface Body	
Body Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Structure Type	Physical Geometry
Surface Type	Program Controlled

TABLE 8
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Body

Object Name	<i>Surface Body</i>
State	Fully Defined
Details of Surface Body	
Body Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Structure Type	Physical Geometry
Surface Type	Program Controlled

TABLE 9
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Body

Object Name	<i>Surface Body</i>
State	Fully Defined
Details of Surface Body	
Body Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Structure Type	Physical Geometry
Surface Type	Program Controlled

TABLE 10
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Point Mass

Object Name	<i>Point Mass</i>
State	Fully Defined
Details of Point Mass	
Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
X	-6,82280340697616E-04 m
Y	6,81083125527948E-04 m
Z	-69,76 m
Mass Definition	Manual
Mass	26837614,91 kg
Define Inertia Values by	via Radius of Gyration
Kxx	59,26 m

Kyy	59,26 m
Kzz	59,26 m
Ixx	94246929749,9167 kg.m ²
Ixy	0.0 kg.m ²
Ixz	0.0 kg.m ²
Iyy	94246929749,9167 kg.m ²
Iyz	0.0 kg.m ²
Izz	94246929749,9167 kg.m ²

TABLE 11

Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Connection Point

Object Name	<i>Connection Point 5</i>
State	Fully Defined
Details of Connection Point 5	
Point Visibility	Visible
Type	Attached to Structure
Structure	Part 3
Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	8 m
Y	0.0 m
Z	-12,74 m

TABLE 12

Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Connection Point

Object Name	<i>Connection Point 6</i>
State	Fully Defined
Details of Connection Point 6	
Point Visibility	Visible
Type	Attached to Structure
Structure	Part 3
Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	-8 m
Y	0.0 m
Z	-12,74 m

TABLE 13

Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Connection Point

Object Name	<i>Connection Point 7</i>
State	Fully Defined
Details of Connection Point 7	
Point Visibility	Visible
Type	Attached to Structure

Structure	Part 3
Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	0.0 m
Y	8 m
Z	-12,74 m

TABLE 14
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Connection Point

Object Name	<i>Connection Point 8</i>
State	Fully Defined
Details of Connection Point 8	
Point Visibility	Visible
Type	Attached to Structure
Structure	Part 3
Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	0.0 m
Y	-8 m
Z	-12,74 m

TABLE 15
Model (A3, B3) > Geometry > Connection Point

Object Name	<i>Fixed Point 1</i>
State	Fully Defined
Details of Fixed Point 1	
Point Visibility	Visible
Type	Fixed
Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	130,55 m
Y	0.0 m
Z	-225 m

TABLE 16
Model (A3, B3) > Geometry > Connection Point

Object Name	<i>Fixed Point 2</i>
State	Fully Defined
Details of Fixed Point 2	
Point Visibility	Visible
Type	Fixed
Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	-130,55 m

Y	0.0 m
Z	-225 m

TABLE 17
Model (A3, B3) > Geometry > Connection Point

Object Name	<i>Fixed Point 3</i>
State	Fully Defined
Details of Fixed Point 3	
Point Visibility	Visible
Type	Fixed
Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	0.0 m
Y	130,55 m
Z	-225 m

TABLE 18
Model (A3, B3) > Geometry > Connection Point

Object Name	<i>Fixed Point 4</i>
State	Fully Defined
Details of Fixed Point 4	
Point Visibility	Visible
Type	Fixed
Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	0.0 m
Y	-130,55 m
Z	-225 m

Connections

TABLE 19
Model (A3, B3) > Connections

Object Name	<i>Connections</i>
State	Fully Defined
Details of Connections	

TABLE 20
Model (A3, B3) > Connections > Catenary Data

Object Name	<i>Catenary Data</i>
State	Fully Defined
Details of Catenary Data	

TABLE 21
Model (A3, B3) > Connections > Catenary Data > Catenary Section

Object Name	<i>Catenary Section 1</i>
State	Fully Defined
Details of Catenary Section 1	
Section Properties	
Mass/Unit Length	65 kg/m
Equivalent Cross-Sectional Area	0,0104 m ²
Stiffness, EA	1175000000 N
Maximum Tension	11760000 N
Bending Stiffness, EI	0.0 N.m ²
Axial Stiffness Coefficient k1	0.0 N
Axial Stiffness Coefficient k2	0.0 N
Axial Stiffness Coefficient k3	0.0 N
Section Hydrodynamic Properties	
Added Mass Coefficient	1
Transverse Drag Coefficient	1
Equivalent Diameter	0,115 m
Longitudinal Drag Coefficient	0,025

TABLE 22
Model (A3, B3) > Connections > Cable

Object Name	<i>Cable 6</i>
State	Fully Defined
Details of Cable 6	
Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Connectivity	Fixed Point & Structure
Start Fixed Point	Fixed Point 2 (Fixed)
End Connection Point	Connection Point 6 (Part 3)
Type	Non-Linear Catenary
Cable Dynamics Properties	
Use Dynamics	Program Controlled
Number of Elements	100
Catenary Section Selection	
Section 1: Type	Catenary Section 1
Section 1: Length	245,5 m
Section 2: Type	None
Cable Properties	
Negative dZ Range	0.0 m
Positive dZ Range	1 m
Number of Vertical Partitions	15
Number of X Coordinates	40

Initial Cable Data	
Initial Cable Tension at Start	2571105,25 N
Initial Cable Tension at End	2684325,25 N

TABLE 23
Model (A3, B3) > Connections > Cable 6

	Section 1
Type	Catenary Section 1
Section Length (m)	245,5
Mass / Unit Length (kg/m)	65
Equivalent CSA (m ²)	0,0104
Stiffness, EA (N)	1175000000
Maximum Tension (N)	11760000
Bending Stiffness, EI (N.m ²)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k1 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k2 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k3 (N)	0.0
Added Mass Coefficient	1
Transverse Drag Coefficient	1
Equivalent Diameter (m)	0,115
Longitudinal Drag Coefficient	0,025
Structural Mass (kg)	-
Displaced Mass of Water (kg)	-
Added Mass (kg)	-
Coefficient of Drag * Area (m ²)	-

TABLE 24
Model (A3, B3) > Connections > Cable

Object Name	<i>Cable 7</i>
State	Fully Defined
Details of Cable 7	
Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Connectivity	Fixed Point & Structure
Start Fixed Point	Fixed Point 4 (Fixed)
End Connection Point	Connection Point 8 (Part 3)
Type	Non-Linear Catenary
Cable Dynamics Properties	
Use Dynamics	Program Controlled
Number of Elements	100
Catenary Section Selection	
Section 1: Type	Catenary Section 1
Section 1: Length	245,5 m

Section 2: Type	None
Cable Properties	
Negative dZ Range	0.0 m
Positive dZ Range	1 m
Number of Vertical Partitions	15
Number of X Coordinates	40
Initial Cable Data	
Initial Cable Tension at Start	0.0 N
Initial Cable Tension at End	0.0 N

TABLE 25
Model (A3, B3) > Connections > Cable 7

	Section 1
Type	Catenary Section 1
Section Length (m)	245,5
Mass / Unit Length (kg/m)	65
Equivalent CSA (m ²)	0,0104
Stiffness, EA (N)	1175000000
Maximum Tension (N)	11760000
Bending Stiffness, EI (N.m ²)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k1 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k2 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k3 (N)	0.0
Added Mass Coefficient	1
Transverse Drag Coefficient	1
Equivalent Diameter (m)	0,115
Longitudinal Drag Coefficient	0,025
Structural Mass (kg)	-
Displaced Mass of Water (kg)	-
Added Mass (kg)	-
Coefficient of Drag * Area (m ²)	-

TABLE 26
Model (A3, B3) > Connections > Cable

Object Name	<i>Cable 8</i>
State	Fully Defined
Details of Cable 8	
Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Connectivity	Fixed Point & Structure
Start Fixed Point	Fixed Point 1 (Fixed)
End Connection Point	Connection Point 5 (Part 3)
Type	Non-Linear Catenary

Cable Dynamics Properties	
Use Dynamics	Program Controlled
Number of Elements	100
Catenary Section Selection	
Section 1: Type	Catenary Section 1
Section 1: Length	245,5 m
Section 2: Type	None
Cable Properties	
Negative dZ Range	0.0 m
Positive dZ Range	1 m
Number of Vertical Partitions	15
Number of X Coordinates	40
Initial Cable Data	
Initial Cable Tension at Start	2571105,25 N
Initial Cable Tension at End	2684325,25 N

TABLE 27
Model (A3, B3) > Connections > Cable 8

	Section 1
Type	Catenary Section 1
Section Length (m)	245,5
Mass / Unit Length (kg/m)	65
Equivalent CSA (m ²)	0,0104
Stiffness, EA (N)	1175000000
Maximum Tension (N)	11760000
Bending Stiffness, EI (N.m ²)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k1 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k2 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k3 (N)	0.0
Added Mass Coefficient	1
Transverse Drag Coefficient	1
Equivalent Diameter (m)	0,115
Longitudinal Drag Coefficient	0,025
Structural Mass (kg)	-
Displaced Mass of Water (kg)	-
Added Mass (kg)	-
Coefficient of Drag * Area (m ²)	-

TABLE 28
Model (A3, B3) > Connections > Cable

Object Name	<i>Cable 10</i>
State	Fully Defined
Details of Cable 10	
Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Connectivity	Fixed Point & Structure
Start Fixed Point	Fixed Point 3 (Fixed)
End Connection Point	Connection Point 7 (Part 3)
Type	Non-Linear Catenary
Cable Dynamics Properties	
Use Dynamics	Program Controlled
Number of Elements	100
Catenary Section Selection	
Section 1: Type	Catenary Section 1
Section 1: Length	245,5 m
Section 2: Type	None
Cable Properties	
Negative dZ Range	0.0 m
Positive dZ Range	1 m
Number of Vertical Partitions	15
Number of X Coordinates	40
Initial Cable Data	
Initial Cable Tension at Start	2571105,25 N
Initial Cable Tension at End	2684325,25 N

TABLE 29
Model (A3, B3) > Connections > Cable 10

	Section 1
Type	Catenary Section 1
Section Length (m)	245,5
Mass / Unit Length (kg/m)	65
Equivalent CSA (m ²)	0,0104
Stiffness, EA (N)	1175000000
Maximum Tension (N)	11760000
Bending Stiffness, EI (N.m ²)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k1 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k2 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k3 (N)	0.0
Added Mass Coefficient	1
Transverse Drag Coefficient	1
Equivalent Diameter (m)	0,115

Longitudinal Drag Coefficient	0,025
Structural Mass (kg)	-
Displaced Mass of Water (kg)	-
Added Mass (kg)	-
Coefficient of Drag * Area (m ²)	-

Mesh

TABLE 30
Model (A3, B3) > Mesh

Object Name	<i>Mesh</i>
State	Meshed
Details of Mesh	
Defaults	
Global Control	Basic Controls
Mesh Parameters	
Defeaturing Tolerance	3 m
Max Element Size	6 m
Max Allowed Frequency	0,831 Hz
Meshing Type	Combined Meshing
Generated Mesh Information	
Number of Nodes	25261
Number of Elements	25281
Number of Diff Nodes	25152
Number of Diff Elements	25158

TABLE 31
Model (A3, B3) > Mesh > Mesh Sizing

Object Name	<i>Mesh Sizing</i>
State	Fully Defined
Details of Mesh Sizing	
Suppressed	Not Suppressed
Select Geometry	3 Bodies
Local Element Size	0,5 m

Hydrodynamic Diffraction (A4)

TABLE 32
Model (A3, B3) > Analysis

Object Name	<i>Hydrodynamic Diffraction (A4)</i>
State	Solved
Details of Hydrodynamic Diffraction	
Analysis Type	Hydrodynamic Diffraction/Radiation

TABLE 33
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Analysis Settings

Object Name	<i>Analysis Settings</i>
State	Fully Defined
Details of Analysis Settings	
Parallel Processing	Program Controlled
Generate Wave Grid Pressures	Yes
Wave Grid Size Factor	2
Common Analysis Options	
Ignore Modelling Rule Violations	Yes
Calculate Extreme Low/High Frequencies	Yes
Calculate Drift Coefficients	Yes
Include Multi-Directional Wave Interaction	Yes
Near Field Solution	Program Controlled
Linearized Morison Drag	No
QTF Options	
Calculate Full QTF Matrix	Yes
Output File Options	
Full QTF Matrix	No
Field Point Wave Elevation	Yes
Source Strengths	No
Potentials	No
Centroid Pressures	No
Element Properties	No
ASCII Hydrodynamic Database	No
Example of Hydrodynamic Database	No

TABLE 34
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Gravity

Object Name	<i>Gravity</i>
State	Fully Defined
Details of Gravity	
Gravity	9,80665 m/s ²

TABLE 35
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Structure Selection

Object Name	<i>Structure Selection</i>
State	Fully Defined
Details of Structure Selection	
Structures to Exclude	None
Group of Structures	
Interacting Structure Groups	None
Structure Ordering	
Structure 1	Part 3

TABLE 36
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Wave Direction

Object Name	<i>Wave Directions</i>
State	Fully Defined
Details of Wave Directions	
Type	Range of Directions, No Forward Speed
Required Wave Input	
Wave Range	-180° to 180°
Interval	45°
Number of Intermediate Directions	7
Optional Wave Directions A	
Additional Range	None
Optional Wave Directions B	
Additional Range	None
Optional Wave Directions C	
Additional Range	None
Optional Wave Directions D	
Additional Range	None

TABLE 37
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Wave Frequency

Object Name	<i>Wave Frequencies</i>
State	Fully Defined
Details of Wave Frequencies	
Intervals Based Upon	Frequency
Frequency/Period Definition	
Range	Manual Definition
Definition Type	Range
Lowest Frequency Definition	Manual Definition
Lowest Frequency	0,025 Hz
Longest Period	40 s
Highest Frequency Definition	Manual Definition
Highest Frequency	0,3183 Hz
Shortest Period	3,14169 s
Number of Intermediate Values	32
Interval Frequency	0,00889 Hz
Additional Frequencies A	
Additional Range	None
Additional Frequencies B	
Additional Range	None
Additional Frequencies C	
Additional Range	None
Additional Frequencies D	
Additional Range	None

Solution (A5)

TABLE 38
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Solution (A5) >
Hydrostatic Results

Object Name	<i>Hydrostatic</i>
State	Solved
Details of Hydrostatic	
Structure	Part 3
Graphical Representation	
Show Centre of Gravity	Yes
Show Centre of Buoyancy	Yes
Show Centre of Floatation	Yes
Results	
Actual Displaced Volume	
Metacentric Height GMX	
Out of Balance Force/Weight, Fz	

TABLE 39
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Solution (A5) >
Hydrodynamic Graph Results

Object Name	<i>RAOs (Response Amplitude Operators)</i> <i>(Distance/Rotation vs Frequency)</i>
State	Solved
Details of RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)	
Presentation Method	Line
Axes Selection	Distance/Rotation vs Frequency
Frequency or Period Scale	Frequency
Export CSV File	Select CSV File...
Line A	
Structure	Part 3
Type	RAOs (Response Amplitude Operators)
Component	Global X
Direction	0.0°
Position of Min in X	0,318
Position of Max in X	0,025
Minimum Value	0,002
Maximum Value	1,274
Line B	
Structure	Undefined...

Hydrostatic Results

Structure

Part 3

Hydrostatic Stiffness

Centre of Gravity (CoG) Position: X: -6.8228e-4 m Y: 6.8108e-4 m Z: -69.760002 m

	Z	RX	RY
Heave (Z):	2036122.1 N	69.095848 N	93.822502 N
Roll (RX):	3958.9004 N.	18544390 N.	522.43787 N.
Pitch (RY):	5375.6333 N.	522.43787 N.	18549784 N.

Hydrostatic Displacement Properties

Actual Volumetric Displacement: 26540.377 m³
Equivalent Volumetric Displacement: 26183.039 m³

Centre of Buoyancy (CoB) Position: X: -6.8241e-4 m Y: 6.8128e-4 m Z: -65.901443 m
Out of Balance Forces/Weight: FX: -1.1322e-6 FY: 4.7292e-7 FZ: 1.3659e-2
Out of Balance Moments/Weight: MX: 4.1483e-5 m MY: 3.1296e-5 m MZ: 5.5172e-6 m

Cut Water Plane Properties

Cut Water Plane Area:					
Centre of Floatation:	X:	-3.3224e-3 m	Y:	2.6254e-3 m	
Principal 2nd Moment of Area:	X:	3295.877 m ⁴	Y:	3327.1912 m ⁴	
Angle Principal Axis makes with X(FRA):		5.4801879°			

Small Angle Stability Parameters

CoG to CoB (BG):		-3.8585603 m			
Metacentric Heights (GMX/GMY):		3.9827437 m		3.9839237 m	
CoB to Metacentre (BMX/BMY):		0.1241835 m		0.1253634 m	
Restoring Moments about Principal Axes (MX/MY):		18544340 N		18549832 N	

TABLE 40
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Solution (A5) > RAOs (Response
Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)

	Line A (m/m)
0,025 Hz	1,27423965930939
0,03389 Hz	0,910169720649719
0,04278 Hz	0,6917804479599
0,05166 Hz	0,544902384281158
0,06055 Hz	0,437321126461029
0,06944 Hz	0,353785336017609
0,07833 Hz	0,28790870308876
0,08722 Hz	0,236033320426941
0,0961 Hz	0,195375457406044
0,10499 Hz	0,163382187485695
0,11388 Hz	0,137862652540207
0,12277 Hz	0,117065563797951
0,13165 Hz	9,96988192200661E-02
0,14054 Hz	8,48575085401535E-02
0,14943 Hz	7,19619914889336E-02
0,15832 Hz	6,11772909760475E-02
0,16721 Hz	5,12559674680233E-02
0,17609 Hz	4,27022874355316E-02
0,18498 Hz	3,53727526962757E-02
0,19387 Hz	2,92303208261728E-02
0,20276 Hz	2,41431556642056E-02
0,21165 Hz	1,99120230972767E-02
0,22053 Hz	1,64253227412701E-02
0,22942 Hz	1,35675938799977E-02
0,23831 Hz	1,12416157498956E-02
0,2472 Hz	9,34372097253799E-03
0,25608 Hz	7,79184373095632E-03
0,26497 Hz	6,49851001799107E-03
0,27386 Hz	5,38828410208225E-03
0,28275 Hz	4,73396899178624E-03
0,29164 Hz	3,9525399915874E-03
0,30052 Hz	3,31180822104216E-03
0,30941 Hz	2,76175234466791E-03
0,3183 Hz	2,26745335385203E-03

TABLE 41
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Solution (A5) > Hydrodynamic Graph Results

Object Name	<i>RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)</i>
State	Solved
Details of RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)	
Presentation Method	Line
Axes Selection	Distance/Rotation vs Frequency
Frequency or Period Scale	Frequency
Export CSV File	Select CSV File...
Line A	
Structure	Part 3
Type	RAOs (Response Amplitude Operators)
Component	Global Z
Direction	0.0°
Position of Min in X	0,141
Position of Max in X	0,043
Minimum Value	2,2e-4
Maximum Value	10,402
Line B	
Structure	Undefined...

TABLE 42
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Solution (A5) > RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)

	Line A (m/m)
0,025 Hz	1,11430060863495
0,03389 Hz	1,47169673442841
0,04278 Hz	10,4024295806885
0,05166 Hz	0,625064373016357
0,06055 Hz	0,152812778949738
0,06944 Hz	4,89389486610889E-02
0,07833 Hz	1,72751415520906E-02
0,08722 Hz	6,51185400784016E-03
0,0961 Hz	2,66876234672964E-03
0,10499 Hz	1,23585166875273E-03
0,11388 Hz	6,55088340863585E-04
0,12277 Hz	3,92330170143396E-04
0,13165 Hz	2,67464958596975E-04
0,14054 Hz	2,21711728954688E-04
0,14943 Hz	2,25677198613994E-04
0,15832 Hz	2,51727818977088E-04
0,16721 Hz	2,89440184133127E-04

0,17609 Hz	3,2861961517483E-04
0,18498 Hz	3,74582916265354E-04
0,19387 Hz	4,19539079302922E-04
0,20276 Hz	4,64058568468317E-04
0,21165 Hz	5,06952812429518E-04
0,22053 Hz	5,47593168448657E-04
0,22942 Hz	5,8303406694904E-04
0,23831 Hz	6,11881900113076E-04
0,2472 Hz	6,30663824267685E-04
0,25608 Hz	6,34396739769727E-04
0,26497 Hz	6,08757545705885E-04
0,27386 Hz	5,31589903403074E-04
0,28275 Hz	5,99862542003393E-04
0,29164 Hz	5,24351955391467E-04
0,30052 Hz	4,56246139947325E-04
0,30941 Hz	3,93692083889619E-04
0,3183 Hz	3,37320700054988E-04

TABLE 43
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Solution (A5) > Hydrodynamic Graph Results

Object Name	<i>RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)</i>
State	Solved
Details of RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)	
Presentation Method	Line
Axes Selection	Distance/Rotation vs Frequency
Frequency or Period Scale	Frequency
Export CSV File	Select CSV File...
Line A	
Structure	Part 3
Type	RAOs (Response Amplitude Operators)
Component	Global RY
Direction	0.0°
Position of Min in X	0,318
Position of Max in X	0,069
Minimum Value	0,004
Maximum Value	0,24
Line B	
Structure	Undefined...

TABLE 44
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Solution (A5) > RAOs (Response
Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)

	Line A (°/m)
0,025 Hz	0,203812978235313
0,03389 Hz	0,189928817818477
0,04278 Hz	0,205363444517119
0,05166 Hz	0,224658848984324
0,06055 Hz	0,237499204417551
0,06944 Hz	0,23976423922063
0,07833 Hz	0,23314231745945
0,08722 Hz	0,220483655730316
0,0961 Hz	0,204439287905904
0,10499 Hz	0,186911435010278
0,11388 Hz	0,169084761338464
0,12277 Hz	0,151599823908775
0,13165 Hz	0,134746051987291
0,14054 Hz	0,118656180695577
0,14943 Hz	0,103433896840907
0,15832 Hz	8,98426608260147E-02
0,16721 Hz	7,66768108602606E-02
0,17609 Hz	6,48748442840736E-02
0,18498 Hz	5,44641185397201E-02
0,19387 Hz	0,045527543052379
0,20276 Hz	3,79772891932456E-02
0,21165 Hz	3,15987996429529E-02
0,22053 Hz	2,62682938980608E-02
0,22942 Hz	2,18478341538469E-02
0,23831 Hz	1,82079336306652E-02
0,2472 Hz	1,52133192313844E-02
0,25608 Hz	1,27473007758925E-02
0,26497 Hz	1,06818455677847E-02
0,27386 Hz	8,86923158970297E-03
0,28275 Hz	7,81815702365125E-03
0,29164 Hz	6,55631876136774E-03
0,30052 Hz	5,51181425032819E-03
0,30941 Hz	4,60868306579766E-03
0,3183 Hz	3,7908567084829E-03

Hydrodynamic Response (B4)

TABLE 45
Model (A3, B3) > Analysis

Object Name	<i>Hydrodynamic Response (B4)</i>
State	Solved
Details of Hydrodynamic Response	
Analysis Type	Hydrodynamic Time Response

TABLE 46
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Response (B4) > Analysis Settings

Object Name	<i>Analysis Settings</i>
State	Fully Defined
Details of Analysis Settings	
Computation Type	Time Response Analysis
Parallel Processing	Program Controlled
Use Cable Dynamics	Yes
Time Response Specific Options	
Analysis Type	Regular Wave Response
Start Time	0.0 s
Time Step	1 s
Duration	3600 s
Number of Steps	3601
Finish Time	3600 s
Starting Position	Program Controlled
Common Analysis Options	
Convolution	Yes
Call Routine "user_force"	No
Use Linear Starting Conditions	No
Use Linear Stiffness Matrix to Calculate Hydrostatic	No
Account for Current Phase Shift	Yes
Use Wheeler Stretching	No
Tube Drag Coefficients	Defined in Geometry
Output File Options	
Joint Axis System for Joint Reaction Force	Fixed Reference Axes
Data List	Yes
Element Properties	No

TABLE 47
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Response (B4) > Regular Wave

Object Name	<i>Regular Wave 1</i>
State	Fully Defined
Details of Regular Wave 1	
Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed

Wave Definition	
Wave Type	Airy Wave Theory
Direction	0°
Amplitude	1 m
Period	25,1818 s
Frequency	3,97112200081011E-02 Hz
Ramping Method	Program Controlled

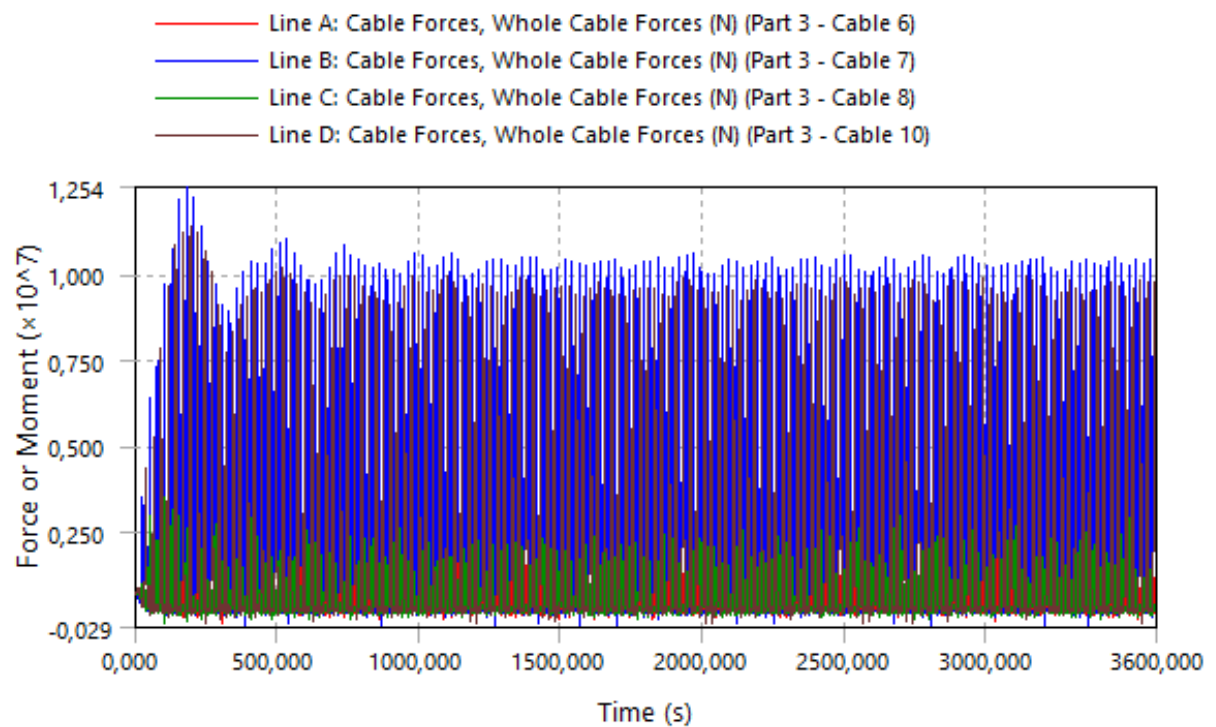
Solution (B5)

TABLE 48
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Response (B4) > Solution (B5) > Hydrodynamic Graph Results

Object Name	<i>Cable Forces, Whole Cable Forces</i>
State	Solved
Details of Cable Forces, Whole Cable Forces	
Presentation Method	Line
Axes Selection	Force/Moment vs Time
Export CSV File	Select CSV File...
Line A	
Structure	Part 3
Type	Cable Forces
SubType	Whole Cable Forces
Component	Tension
Connection	Cable 6
Position of Min in X	308
Position of Max in X	457
Minimum Value	-149667,406
Maximum Value	3758483,25
Line B	
Structure	Part 3
Type	Cable Forces
SubType	Whole Cable Forces
Component	Tension
Connection	Cable 7
Position of Min in X	3357
Position of Max in X	180
Minimum Value	-288546,094
Maximum Value	12542441
Line C	
Structure	Part 3
Type	Cable Forces
SubType	Whole Cable Forces
Component	Tension
Connection	Cable 8
Position of Min in X	104

Position of Max in X	102
Minimum Value	-168373,578
Maximum Value	3506300,25
Line D	
Structure	Part 3
Type	Cable Forces
SubType	Whole Cable Forces
Component	Tension
Connection	Cable 10
Position of Min in X	2565
Position of Max in X	194
Minimum Value	-185135,031
Maximum Value	11373993

FIGURE 4
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Response (B4) > Solution (B5) > Cable Forces, Whole Cable Forces



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN E

SCRIPT MATLAB FFT

```
clc;clear; close all;
warning off MATLAB:divideByZero
sheet = 'sheet3'
A = xlsread('DATA MENTAH TERTAMBAT TEGANGAN TALI',sheet);
t = A(:,1);
s = A(:,2);
h = A(:,3);
p = A(:,4);
f1= A(:,5);
f2= A(:,6);
f3= A(:,7);
f4= A(:,8);

sfr = 1;
t = (1:length(t))/sfr;

shpf = [s,h,p,f1,f2,f3,f4];
for i=1:7
    subplot(7,1,i)
    plot(t,shpf(:,i));
    if i==1
        ylabel('\zeta_x (mm)');
    elseif i==2
        ylabel('\zeta_z (mm)');
    elseif i==3
        ylabel('\zeta_p (deg)');
    else
        ylabel('F (gr)');
    end
end
xlabel('t (sec)');

[xb,yb]=ginput(2);
BatasBawah = max(round(xb(1)*sfr),1);
BatasAtas = min(round(xb(2)*sfr),size(s,1));
k = BatasBawah:BatasAtas;lenk = length(k);

tk =(BatasBawah:BatasAtas)/sfr;
sk = s(k);
hk = h(k);
pk = p(k);
f1k= f1(k);
f2k= f2(k);
f3k= f3(k);
f4k= f4(k);
shpfk = [sk,hk,pk,f1k,f2k,f3k,f4k];
```



```

figure;
for i=1:7
    subplot(7,1,i)
    plot(t,shpf(:,i),tk,shpfk(:,i),'r');
    if i==1
        ylabel('\zeta_x (mm)');
    elseif i==2
        ylabel('\zeta_z (mm)');
    elseif i==3
        ylabel('\zeta_p (deg)');
    else
        ylabel('F (gr)');
    end
end
xlabel('t (sec)');

```

```

figure;
for i=1:7
    Yf = shpf(:,i);
    lenk = length(Yf);
    sr=1/sfr;
    TT = (0:lenk-1)./sfr;
    tmax=TT(end)-TT(1);
    fdf=1/lenk/sr;
    ff=(0:fd:1/2/sr);
    FF=sr*fft(Yf);
    fampl=2/(tmax+sr)*abs(FF);
    TT = (0:lenk-1)./sfr;
    tmax=TT(end)-TT(1);
    fdf=1/lenk/sr;
    ff=(0:fd:1/2/sr);
    FF=sr*fft(Yf);
    ampl=2/(tmax+sr)*abs(FF);
    periode(:,i)=(1./(ff(1:length(ff))))';
    Ampl(:,i)=ampl(1:length(ff));
    subplot(7,1,i)
    plot(periode(:,i),Ampl(:,i));
    if i==1
        ylabel('\zeta_x (mm)');
    elseif i==2
        ylabel('\zeta_z (mm)');
    elseif i==3
        ylabel('\zeta_p (deg)');
    else
        ylabel('F (gr)');
    end
end
xlabel('t (sec)');

```

```
period= periode(2:end,1)
hasil = Ampl(2:end,:)
[Amplheave,n] = max(hasil(:,2));
Period  = period(n)
Amplsurge = hasil(n,1)
Amplheave
Amplpitch = hasil(n,3)
Amplf1    = hasil(n,4)
Amplf2    = hasil(n,5)
Amplf3    = hasil(n,6)
Amplf4    = hasil(n,7)
```

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN F TERTAMBAT *TAUT*

NUMERIS

Periode		Frequency		Surge		Heave		Pitch		RAO Tension A	RAO Tension B	RAO Tension C	RAO Tension D
FFT (s)	Real (s)	Hz	Rad/s	mm	mm/mm	mm	mm/mm	Deg	Deg/mm	Ton/m	Ton/m	Ton/m	Ton/m
40,0111	40	0,0250	0,1571	1,937	0,620	1,350	0,432	13,363	4,276	224,811	224,811	213,299	217,333
38,3211	38	0,0263	0,1653	1,759	0,563	0,800	0,256	11,515	3,685	211,380	211,380	180,788	187,350
34,9128	35	0,0286	0,1795	3,915	1,253	1,893	0,606	4,028	1,289	147,856	144,869	107,608	89,946
33,0367	33	0,0303	0,1904	4,272	1,367	1,346	0,431	6,547	2,095	209,501	209,501	162,416	127,153
29,5164	29,5072	0,0339	0,2129	2,717	0,869	1,055	0,337	2,163	0,692	103,829	79,803	64,356	49,497
25,1818	25,1193	0,0398	0,2501	1,951	0,624	0,707	0,226	1,662	0,532	100,652	91,213	79,850	71,417
23,3831	23,3754	0,0428	0,2688	1,977	0,632	1,138	0,364	1,365	0,437	81,087	79,796	70,418	68,981
21,8242	21,8627	0,0457	0,2874	1,450	0,464	1,074	0,344	0,901	0,288	53,962	56,521	42,362	44,570
19,3602	19,3573	0,0517	0,3246	1,458	0,467	2,430	0,778	1,052	0,337	139,395	139,395	79,701	88,557
15,8738	16,0000	0,0625	0,3927	0,996	0,319	0,278	0,089	0,670	0,214	45,671	41,403	27,294	24,143
14,404	14,4009	0,0694	0,4363	0,842	0,269	0,098	0,031	0,664	0,212	44,458	45,627	21,442	20,910
12,7695	12,7665	0,0783	0,4922	0,575	0,184	0,172	0,055	0,405	0,129	46,646	68,919	29,499	26,724
5,6798	5,6789	0,1761	1,1064	0,085	0,027	0,003	0,001	0,130	0,041	7,696	8,036	7,385	7,743

EKSPERIMEN

Periode		Frequency		Surge		Heave		Pitch		RAO Tension A	RAO Tension B	RAO Tension C	RAO Tension D
Eks(s)	Real (s)	Hz	Rad/s	mm	mm/mm	mm	mm/mm	Deg	Deg/mm	Ton/m	Ton/m	Ton/m	Ton/m
3,6	40,2492	0,0248	0,1571	1,042	0,417	0,103	0,065	0,065	0,0783	55,224	56,061	42,520	43,200
2,6	29,0689	0,0344	0,2129	1,512	0,605	0,187	0,198	0,108	0,2816	95,982	97,436	58,493	59,429
2,1	23,4787	0,0426	0,2688	1,235	0,494	0,150	0,178	0,178	0,0962	93,571	94,988	76,040	77,257
1,7	19,0066	0,0526	0,3246	1,184	0,474	0,156	0,296	0,196	0,1736	117,313	119,091	78,740	80,000
1,3	14,5344	0,0688	0,4363	0,757	0,303	0,082	0,082	0,082	0,1492	50,149	50,909	24,882	25,280
1,1	12,2984	0,0813	0,4922	0,538	0,215	0,081	0,081	0,081	0,1351	44,776	45,455	10,709	10,880
0,5	5,5902	0,1789	1,1064	0,027	0,011	0,067	0,067	0,067	0,0015	1,658	1,684	2,100	2,133

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

